

اختبار استـالمواد الهندسية

أ.د. جعفر الحيدري

دائرة هندسة المواد والمعادن
جامعة البلقاء التطبيقية



اختبارات المواد
الهندسية

حقوق الطبع محفوظة للناسر
الطبعة الأولى
1434هـ - 2013م

الحيدري، جعفر .
اختبارات المواد الهندسية / جعفر الحيدري ،
عمان دار المعتر للنشر 2013

ر.أ: 2012/9/1885

الواصفات / المواد الهندسية // اختبارات //

*أعدت دائرة المكتبة الوطنية بيانات الفهرسة والتصنيف الأولية
* يتحمل المؤلف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مصنفه ولا يعبر هذا
لمصنف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية أو أي جهة حكومية أخرى.

اختبارات المواد الهندسية

أ. د. جعفر الحيدري

دائرة هندسة المواد والمعادن

جامعة البلقاء التطبيقية

الإهداء

إلى رفيقة دربي الطويل
إلى من وقفت معي في السراء والضراء
زوجتي العزيزة ...
إلى أولادي الأحباء ...
إلى طلبتي الأكارم ...
أهدي كتابي هذا

جعفر الحيدري

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة

لقد لاحظت خلال أكثر من عشرة سنوات من تدريسي لمادة (اختبار المواد الهندسية) أن مفرداتها غير موجودة في مصدر واحد. وذلك لاختلاف أسس وتقنيات كل مجموعة من الإختبارات عن المجموعة الأخرى. وهذا ما يصعب على الطالب في المرحلة الجامعية الأولية أو حتى من يريد الإطلاع وبصورة موجزة على طرائق الاختبارات سواء الإئتلافية منها أو اللإئتلافية.

ولذا فقد رأيت أن كتاباً يفي بالأسس النظرية ولا يغفل الناحية التطبيقية سيسد فراغاً في هذا المجال وسيعود بالفائدة ليس على طلبة قسم هندسة المواد والمعادن فحسب بل على طلبة أقسام الهندسة الميكانيكية أو هندسة الإنتاج أو الهندسة الصناعية أو الأقسام المناظرة الأخرى في جامعات ومعاهد الوطن العربي.

وأنا لا أدعي أنني قد بلغت الكمال في إعداد مفردات هذا الكتاب وإنما هو حصيلة مجموع خبرتي من خلال تدريسي ومطالعاتي وبحوثي. وما أجمل قول العماد الأصفهاني في هذا المجال «إنني رأيت انه لا يكتب إنسان كتاباً في يومه إلا قال في غده لو غيرت هذا كان احسن ولو زيدت هذا لكان أجمل، وهذا أعظم العبر وهو دليل على استيلاء النقص على جملة البشر».

والله اسأل أن يوفقني لخدمة طلبتنا الأعزاء في وطننا العربي الحبيب.

جعفر الحيدري

السلط - جامعة البلقاء التطبيقية

المحتويات

١٧	..... الفصل الأول: الإختبارات اللاإتلافية
١٧	..... ١-١ المقدمة
١٨	..... ١-٢ ماهي الغاية من الفحص
٢٠	..... ١-٣ طبيعة العيوب ومصادرها
٢٢	..... ١-٤ طرائق الفحص اللا إتلافية
٢٤	..... ١-٤-١ طريقة المعاينة البصرية
٢٩	..... ١-٤-٢ طريقة السوائل المتغلغلة
٣٧	..... ١-٤-٣ الفحص بطريقة الدقائق المغناطيسية
٥١	..... ١-٤-٤ الفحص بالطريقة الشعاعية وتشتمل على:
٥١	..... أ- الفحص بالأشعة السينية
٥١	..... ب- الفحص بأشعة كاما
٧٦	..... ٢- الفحص بالنيوترونات اشعاعياً
٨٢	..... ١-٤-٥ الفحص بطريقة التيارات الدوامة
١٠٧	..... ١-٤-٦ الفحص بالأمواج فوق السمعية
١٢٦	..... ١-٥ خاتمة
١٢٨	..... - تمارين الفصل الأول
١٣١	..... الفصل الثاني: طرائق قياس درجات الحرارة
١٣١	..... ٢-١ المقدمة
١٣١	..... ٢-٢ مقاييس درجات الحرارة
١٣٣	..... ٢-٣ قانون الغازات العام
١٣٤	..... ٢-٤ المحارير

١٣٥	٢-٥ الأقلام والمؤشرات الصبغية
١٣٥	٢-٦ الكريات والمخاريط المؤشرة
١٣٦	٢-٧ أجهزة قياس درجات الحرارة بالمقاومة الكهربائية
١٣٧	٢-٨ متحسسات الحرارة (الثرميستور)
١٤٠	٢-٩ أجهزة القياس الكهربائية الحرارية
١٤٩	٢-١٠ أجهزة قياس درجات الحرارة الشعاعية (بايروميتر)
١٥٢	٢-١١ أجهزة قياس درجات الحرارة الضوئية
١٥٦	- تمارين الفصل الثاني

١٥٧	الفصل الثالث : أساسيات علم البلورات
١٥٧	٢-١ المقدمة
١٥٨	٢-٢ الشبكة البلورية
١٦٠	٢-٣ الأنظمة البلورية
١٦٤	٢-٤ تعيين نقاط الشبكة
١٦٥	٢-٥ اتجاهات ومستويات الشبكة البلورية
١٦٥	٢-٥-١ المستويات في البلورات
١٦٩	٢-٥-٢ أسلوب كتابة أدلة المستوى في البلورة السداسية
١٦٩	٢-٥-٣ الاتجاهات في البلورات
١٧٠	٢-٦ علاقة حجم وكثافة الذرات مع الخلية الأساسية
١٧١	٢-٧ المسافة بين المستويات البلورية
١٧٢	٢-٨ الزوايا بين المستويات البلورية
١٧٤	٢-٩ حجم الخلية الأساسية
١٧٥	٢-١٠ كثافة المادة البلورية
١٧٦	- تمارين الفصل الثالث

١٧٩	الفصل الرابع : خصائص الأشعة السينية
١٧٩	١-٤ المقدمة
١٨٠	٢-٤ الطيف المستمر والطيف المميز للأشعة السينية
١٨٥	٣-٤ امتصاص الأشعة السينية
١٨٨	٤-٤ ترشيح الأشعة السينية
١٩١	٥-٤ أنبوب الأشعة السينية
١٩٢	٦-٤ الكشف عن الأشعة السينية
١٩٣	٧-٤ الوقاية من الأشعة السينية
١٩٤	- تمارين الفصل الرابع
١٩٥	الفصل الخامس : حيود الأشعة السينية
١٩٥	١-٥ المقدمة
١٩٦	٢-٥ الحيود
٢٠١	٣-٥ قانون براك
٢٠٢	٤-٥ اتجاهات الحيود
٢٠٤	٥-٥ طرائق الحيود
٢٠٤	١-٥-٥ طريقة لاوا
٢٠٧	٢-٥-٥ طريقة تدوير البلورة
٢٠٨	٣-٥-٥ طريقة المسحوق وتشمل ثلاث تقنيات:
٢٠٩	١- طريقة الكاميرا المبتزة
٢١٠	٢- طريقة ثقب الدبوس
٢١١	٣- طريقة ديبي - شيرر
٢١٨	٦-٥ اختيار الطول الموجي للشعاع
٢١٩	٧-٥ المطياف والمحياد
٢٢٠	١-٧-٥ المحياد

٢٢٢	٥-٧-٢ المطياف
٢٢٧	٥-٨ مستويات الانعكاس الممكنة ومعامل البنية الذرية (F)
٢٣٦	٥-٩ تحليل الحيود
٢٤٠	- تمارين الفصل الخامس

٢٤٣	الفصل السادس : المجهر الضوئي
٢٤٣	٦-١ المقدمة
٢٤٤	٦-٢ أنواع المجهر الضوئي وتركيبه
٢٤٨	٦-٣ قدرة التمييز
٢٤٩	٦-٤ عيوب العدسات الضوئية
٢٥٤	٦-٥ طرائق زيادة قدرة التمييز
٢٥٥	٦-٦ استخدام المرشحات في الفحص والتصوير بالمجهر الضوئي
٢٥٧	- تمارين الفصل السادس

٢٥٩	الفصل السابع : المجهر الإلكتروني
٢٥٩	٧-١ الخواص الأساسية للإلكترونات
٢٥٩	٧-٢ الطبيعة الموجية للإلكترونات
٢٦٢	٧-٣ طرائق انبعاث الإلكترونات
٢٦٥	٧-٤ التفاعل بين الحزمة الإلكترونية والمادة الصلبة
٢٦٦	٧-٥ المجهر الإلكتروني النافذ
٢٦٦	٧-٥-١ المقدمة
٢٦٧	٧-٥-٢ العدسات الإلكترونية
٢٧٢	٧-٥-٣ تصميم المجهر الإلكتروني النافذ (TEM)
٢٧٦	٧-٥-٤ الزيغ في العدسات المغناطيسية
٢٨٠	٧-٥-٥ وضوح الصورة وقدرة تمييز العدسة الشبكية

٢٨٤	٧-٥-٦ عمق المجال وعمق التبئير
٢٨٦	٧-٥-٧ تقنية حيود الإلكترونات وتتضمن:
٢٨٦	أ- المقدمة
٢٨٨	ب- الطبيعة الهندسية لأنماط حيود الإلكترونات
٢٩٠	ج- أنواع نمط حيود الإلكترونات
٢٩٢	د- معايرة أنماط الحيود الإلكتروني وقياس ثابت الكاميرا (λL)
٢٩٨	هـ- تطبيقات وتفسير أنماط الحيود الإلكتروني من المناطق المختارة
٣٠٠	و- التحليل الكيماوي وتحليل البنية
٣٠٢	٧-٥-٨ التباين الصوري في المجهر الإلكتروني النافذ ويتضمن:
٣٠٢	أ- تباين الإمتصاص والتباين الطوري
٣٠٧	ب- تباين الحيود
٣١٧	٧-٥-٩ أسلوب تكوين الصورة وتسجيلها وأنواعها
٣١٩	٧-٥-١٠ اختيار مقدار الفولتية المعجلة المناسبة
٣١٩	٧-٥-١١ طرائق تحضير العينات للمجهر الإلكتروني النافذ وتتضمن عدة طرائق:
٣١٩	١- الطريقة المباشرة لتكوين الأغشية الرقيقة
٣٢٢	٢- التحضير من جرم النماذج نفسها
٣٣٠	٧-٥-١٢ بعض تطبيقات المجهر الإلكتروني النافذ
٣٣٣	- تمارين الفصل السابع - القسم الأول
٣٣٦	٧-٦ المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)
٣٣٦	٧-٦-١ المقدمة
٣٣٦	٧-٦-٢ أساس عمل المجهر الماسح
٣٣٧	٧-٦-٣ تصميم وبناء المجهر الإلكتروني الماسح
٣٤٠	٧-٦-٤ آليات تباين الصورة
٣٤٥	٧-٦-٥ تحضير العينات للمجهر الماسح
٣٤٦	٧-٦-٦ تطبيقات المجهر الإلكتروني الماسح

٣٤٩	٧-٧ محلل المجس الإلكتروني الدقيق
٣٤٩	٧-٧-١ المقدمة
٣٤٩	٧-٧-٢ محلل المجس الإلكتروني الدقيق
٣٤٩	٧-٧-٣ تصميم محلل المجس الإلكتروني الدقيق
٣٥١	٧-٧-٤ مطايف الأشعة السينية
٣٥٤	٧-٧-٥ التحليل الكمي بمحلل المجس الإلكتروني الدقيق
٣٥٧	٧-٧-٦ العدادات وكشف الإشارة
٣٦٠	٧-٧-٧ تطبيقات محلل المجس الإلكتروني الدقيق
٣٦٣	- تمارين الفصل السابع - القسم الثاني
٣٦٥	الفصل الثامن : الميتالوغرافيا الكمية (ستيريولوجي)
٣٦٥	٨-١ المقدمة
٣٦٦	٨-٢ أسس وقواعد الفحص
٣٦٧	٨-٣ الكسر الحجمي
٣٦٨	٨-٤ الكسر المساحي
٣٦٩	٨-٥ الكسر الخطي
٣٦٩	٨-٦ الكسر النقطي
٣٨٣	٨-٧ قياس الحجم الحبيبي
٣٩٣	٨-٨ قياس حجم (مقاس) الدقائق
٣٩٨	- تمارين الفصل الثامن
٤٠١	الفصل التاسع : المقاومة الكهربائية وبعض تطبيقاتها في الفحص
٤٠١	٩-١ المقدمة
٤٠١	٩-٢ مدى المقاومة
٤٠٣	٩-٣ نظرية الإلكترون الحر

٤٠٨	٩-٤ التوصيل بوساطة الإلكترونات الحرة
٤١١	٩-٥ عمليات التصادم
٤١٤	٩-٦ بعض تطبيقات المقاومة الكهربائية
٤١٥	٩-٧ مقاييس الإنفعال الكهربائية
٤٢٠	٩-٨ قياس عمق الشق
٤٢٥	- تمارين الفصل التاسع
٤٢٧	الفصل العاشر: الفحوص الميكانيكية
٤٢٧	١٠-١ المقدمة
٤٢٧	١٠-٢ الصلادة واختبار الصلادة
٤٢٩	١٠-٢-١ اختبار برينيل
٤٣٢	١٠-٢-٢ اختبار فيكرز
٤٣٤	١٠-٢-٣ اختبار روكويل
٤٣٧	١٠-٢-٤ اختبار روكويل السطحي
٤٣٩	١٠-٢-٥ طريقة نوب لاختبار الصلادة
٤٤٠	١٠-٢-٦ طريقة اختبار صلادة صنودر
٤٤٠	١٠-٣ مقاومة الشد
٤٤٠	١٠-٣-١ الإجهاد والإنفعال
٤٤٦	١٠-٣-٢ الرسوم البيانية للحمل - الإستطالة
٤٤٧	١٠-٣-٣ الرسم البياني للحمل - الإستطالة لفولاذ منخفض الكربون غير المصلد
٤٥٠	١٠-٣-٤ إجهاد الصمود
٤٥١	١٠-٤ اختبار الشد
٤٥٧	١٠-٥ معامل الأمان
٤٥٨	١٠-٦ مقاومة الصدمة واختبارها
٤٥٨	١٠-٦-١ الطاقة

٤٥٨	١٠-٦-٢ المتانة والهشاشة والمستطالية
٤٥٩	١٠-٦-٣ اختبار الصدمة لقضيب فيه حَزْ
٤٦٢	١٠-٦-٤ اختباري شاربي وايزود
٤٦٤	١٠-٧ الزحف
٤٦٦	١٠-٧-١ اختبار الزحف
٤٦٩	١٠-٨ الكلال
١٧١	١٠-٨-١ اختبار الكلال
٤٧٤	١٠-٨-٢ العوامل المؤثرة على مقاومة الكلال
٤٧٧	١٠-٩ طرائق فحص أخرى
٤٧٧	١٠-٩-١ اختبار الانضغاط
٤٧٨	١٠-٩-٢ اختبار الثني
٤٨١	١٠-٩-٣ اختبار اركسن لفحص التقبب
٤٨٢	١٠-٩-٤ اختبار اللي
٤٨٤	- تمارين الفصل العاشر
٤٨٧	الفصل الحادي عشر : تقنيات الفراغ
٤٨٧	١١-١ المقدمة
٤٨٧	١١-٢ الضغط
٤٨٩	١١-٣ وحدات الضغط
٤٩٠	١١-٤ قياس الفراغ
٤٩١	١١-٥ توليد الفراغ
٤٩٧	١١-٦ أجهزة الفراغ
٥٠٠	١١-٦-١ التشحيم
٥٠٠	١١-٦-٢ أعمدة السد
٥٠٠	١١-٧ منظومة وحدة التفريغ

٥٠٣	٨-١١ تطبيقات الفراغ
٥٠٥	- تمارين الفصل الحادي عشر
٥٠٧	الفصل الثاني عشر: قياس الإنهاء السطحي (خشونة السطح)
٥٠٧	١-١٢ المقدمة
٥٠٩	١-١-١٢ عمر الكلال
٥٠٩	١-٢-١٢ خواص الارتكاز (المرتكزات)
٥١١	١-٣-١٢ البلى
٥١١	١-٢-١٢ ما المقصود بنسيج او تضاريس السطح
٥١٤	١-٣-١٢ طرائق قياس الإنهاء السطحي
٥١٥	١-٣-١٢ أجهزة مجس الرقم
٥١٧	١-٣-١٢ مقياس السطح لتوملنسن
٥١٩	١-٣-١٢ جهاز تيلور وهوبسون (تيليسيرف)
٥٢٠	٤-١٢ تحليل آثار السطح
٥٢١	١-٤-١٢ طريقة الإرتفاع بين القعر والقمة
٥٢٢	١-٤-١٢ قيمة جذر معدل المربعات
٥٢٣	١-٤-١٢ طريقة معدل خط المركز
٥٢٧	٥-١٢ مجهر التداخل الضوئي
٥٣٠	٦-١٢ طرائق النسخ (الطبعة)
٥٣٣	٧-١٢ الرموز المستخدمة في توصيف درجة الإنهاء السطحي
٥٣٥	٨-١٢ مدى الإنهاء السطحي الذي يمكن الوصول اليه بعمليات التشغيل المختلفة
٥٣٦	- تمارين الفصل الثاني عشر
٥٣٧	المصادر
٥٤١	المصطلحات العلمية المستخدمة

الفصل الأول

الاختبارات اللا إتلافية Nondestructive Testing

١-١ المقدمة

قبل مدة ليست بالطويلة كان المصممون يصرون على أن المواد المستخدمة يجب أن تكون خالية من العيوب تماماً إلا أنه أكتشف فيما بعد أن هذا التحديد شيء غير عملي وغير دقيق في نفس الوقت لكنه يمكن القول أن المفروض بالمواد الهندسية أن تكون خالية من العيوب الخطره والتي لا يمكن استخدام الاجزاء او المواد بوجودها أو أن عمرها سينخفض الى جزء قليل من عمرها المفروض.

أما الآن فمن المعروف أن جميع المواد الهندسية تحتوي بعض العيوب بصورة أو أخرى، والتي يمكن أن تقسم الى ثلاثة أنواع رئيسية هي:

- ١- العيوب الضارة والتي قد تكون بحد ذاتها خطره آنياً أو قد تكون من النوع أو في المكان التي يمكن أن تنمو الى حد الخطورة عند الإشتغال أو الخدمة.
- ٢- العيوب غير الضارة إما لكونها صغيرة الحجم أو وجودها في مكان لا يؤثر على الإستخدام كالمسامات الدقيقة جداً في مكان خالي من الإجهادات الداخلية على سبيل المثال.

- ٣- العيوب المفيدة، كالعيوب المتحركة الموجودة في البنية البلورية كالإنخلاعات (dislocations) حيث أن قابليتها على الحركة والتفاعل فيما بينها تمنح المادة المتانة (toughness) المطلوبة والاكتنافات الصغيرة (Small inclusions)

ومجمل التصفيحات (gross Laminations) وغير ذلك من العيوب التي من شأنها أن تزيد من المتانة باعاقبة نمو الشقوق التي تعترضها.

وإذا أريد للفحوص اللااتلافية (NDT) (وهو الإصطلاح الذي يطلق على كل الطرائق الممكنة لفحص المواد أو الأجزاء من دون إتلافها أو التأثير على العمل الذي صممت من أجله أو على عمرها فيما بعد. ومن وجهة النظر الصناعية فإن الفحوص اللا اتلافية تقرر مدى صلاحية المادة أو الجزء للعمل الذي صمم من أجله) أن تعطي نتائج جيدة فإنها يجب ألا تقتصر على تقرير وجود العيب أو عدمه فحسب بل تعين شكله وحجمه وكذلك تعين نوعية العيوب سواء كانت ضارة ام غير ضارة وحسب العمل المصمم من أجله ذلك الجزء أو المنتج. ومن الجدير بالذكر فإن المصمم هو الذي يقرر الطريقة الأمثل للفحص وكذلك صلاحية الجزء أو عدمه وحسب دليل التصميم الهندسي الذي يشير الى مدى إمكانية وحدود وكذلك تكاليف الطرائق العامة للفحوص اللا اتلافية.

٢-١ الغاية من الفحص (The aim of the test):

يجب فحص المنتجات الهندسية أثناء وبعد التصنيع وعادةً تفحص أثناء الخدمة والعمل أيضاً ضماناً لصلاحيتها التامة للأغراض المصممة من أجلها وكذلك تفحص المنتجات لضمان النوعية المطلوبة والسيطرة عليها. ومن خلال خبرة المهندسين والمشتغلين في مجال الفحوص اللا إتلافية يمكن تحقيق الغاية المتوخاة من الفحص.

وهناك اربع حقائق تحدد الطريق الى الفحوص اللا اتلافية وهي:

- ١- كون العيوب موجودة في المواد بمديات واسعة من الأنواع والحجوم.
- ٢- هناك بالمقابل مدى شامل من الأدوات والأجهزة لكشف العيوب.
- ٣- تؤثر بعض العيوب سلباً على سلامة الجزء (المنتج) وبعضها لا تضر عند تواجدها فيه.
- ٤- مكان العيب وشكله وميله هي في الغالب أكثر أهمية من حجمه بصورة منفردة

او عدد مثل هذه العيوب في الجزء، مع الاخذ بنظر الاعتبار المسافة بين العيوب فإذا كانت المسافة صغيرة فربما تعمل العيوب المتناثرة والمتقاربة كعيوب كبير واحد.

وكما ذكر آنفاً فهناك عيوب على المستوى الذري فعلى سبيل المثال فالمليميتر المكعب الواحد من الفولاذ المطيل (mild steel) يحتوي على ملايين العيوب، على المستوى الذري، كالشفور (vacancies) والانخلاعات ، وأن قابلية بعض هذه العيوب على الحركة والتضاعف والتفاعل فيما بينها هي التي تجعل المعادن متينة وقابلة على تحمل تراكيز الاجهادات عند الثلمات او الحزوز (notches) وقابله للتشكيل والتشغيل والانحناء المفيد اضافة الى تحملها للصدمات. وهذه الصفات هي الأساس التي جعلت المعادن تستخدم لأغلب الاغراض الهندسية. أما الخزفيات فمع أنها صلبة جداً إلا أنها هشّة وهشاشيتها هذه ناشئة بالدرجة الأساس من عدم امكانية هذه العيوب على التحرك و التضاعف خلال المادة.

ومن المعلوم ان المقصود بالعيوب عند التكلم عن طرائق الفحص اللا اتلافية هي تلك العيوب التي تكون أكبر بكثير من الانخلاعات و عيوب البنية الذرية الاخرى وكذلك الترسبات الدقيقة جداً. والتي تعنيها هنا هي العيوب التي إذا وجدت في الجزء قد تؤدي الى فشله في أداء العمل المصمم من أجله كالقصور والشقوق في أنابيب الضغط العالي والمراجل، على سبيل المثال، الى غير ذلك من أنواع العيوب.

وبما أن وجود العيب في الجزء هو ليس المعيار الوحيد لرفض او قبول او تصليح الجزء فهناك عوامل أخرى تشترك في تحديد ذلك إلا أنه من المهم جداً ان تعين العيوب المرفوضة (أي التي يُرفض الجزء عند وجودها فيه) مسبقاً وبشكل واضح ومن ثم تبقى العيوب الاخرى التي لا يضر وجودها بعمل الجزء.

ومن الممكن استنباط بعض القواعد الهامة في الفحوص اللا إتلافية هي :

١- عدم إمكانية وجود جزء خالي من اي خلل تماماً والسعي لتحقيق ذلك سيكلف كثيراً.

٢- الفحص بشكل غير مؤثر (سواءً باختيار الطريقة أو أسلوب الفحص) سيكلف ثمناً باهظاً في الأموال وربما في الأرواح أيضاً.

٣- الإسراف في تعدد طرائق الفحص لجزء معين فيه هدر للأموال والوقت الى جانب استهلاك الاجهزة، كما أن تعدد الطرائق قد لا يحسّن النتائج كما لو تم اختيار الطريقة المناسبة فقط.

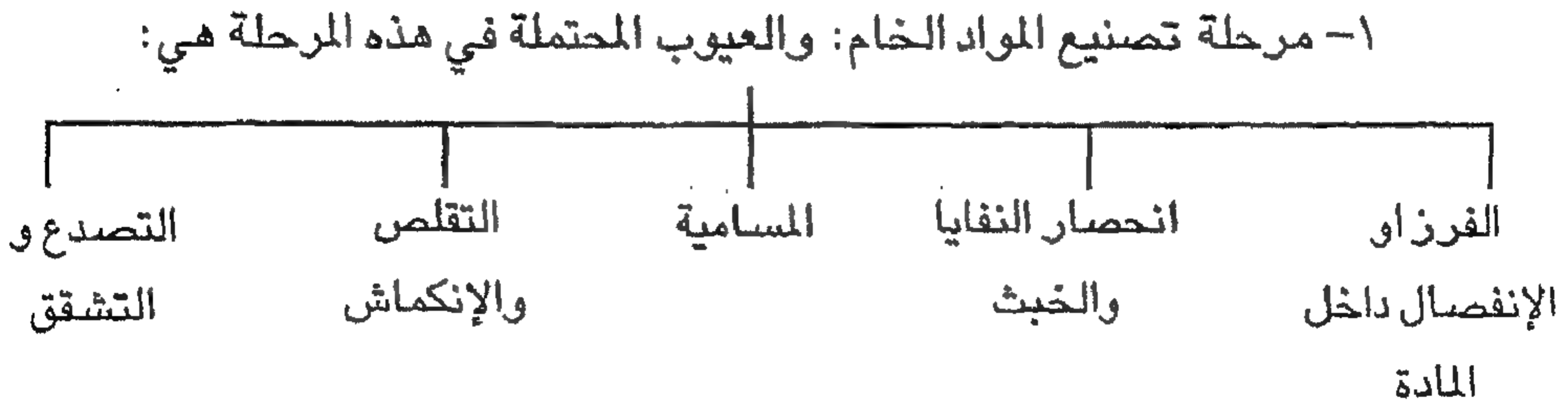
٤- العيوب المكتشفة في الجزء يجب إلا تصلح مباشرة قبل ان تُدرس جيداً فقد يكون تصليحها أكثر ضرراً على الجزء مما لو تركت على ما هي عليه.

٥- المصمم هو الذي ينتقي عادة الطريقة المناسبة للفحص والفترة البينية بين فحص وآخر وذلك لضمان سلامة الاجهزة والعاملين. ويعتمد ذلك على آلية وأسلوب الكسر أو العيب المتوقع في الجزء، فيجب أن تدرس ومنها يتم استنتاج العيوب الخطرة التي تؤدي الى هذا الكسر في المنتج عند الخدمة او العمل ومن هذه المعلومات يتم تعيين طريقة الفحص والفترة الزمنية بين فحص وآخر.

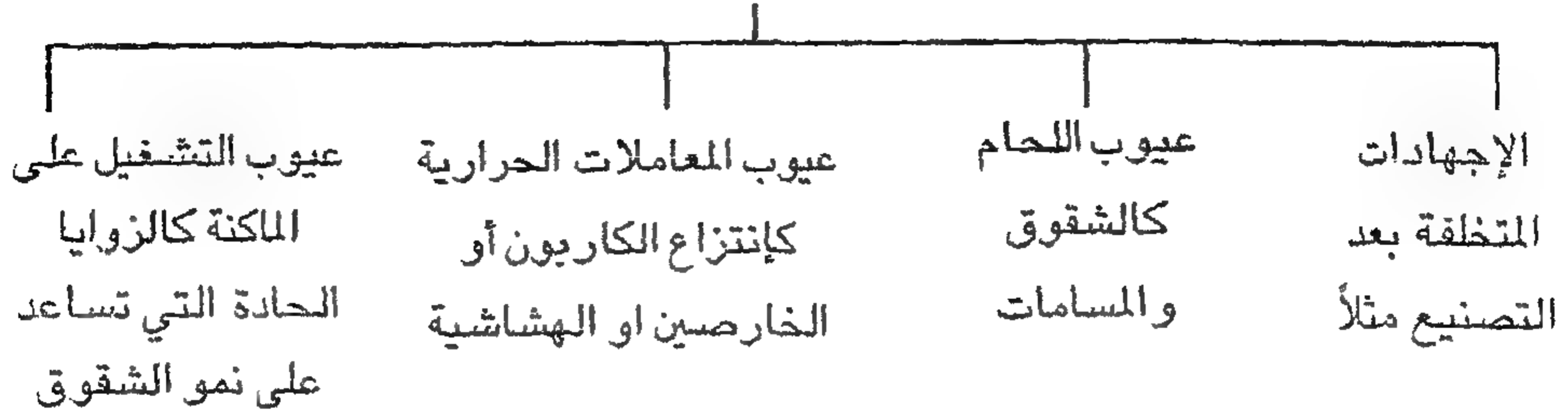
وتوجد بعض المصادر والكتب حول ماهو مقبول من أنواع العيوب في المواد مع مختلف الغايات المصممة من أجلها مثل مطبوعات المعهد البريطاني للمواصفات والمقاييس اضافة الى مطبوعات معهد اللحام.

٣-١ طبيعة العيوب ومصادرها : Nature and Sources of Defects

يمكن أن تصيب العيوب او التصدعات والخلل.. الخ المنتج الصناعي في اي مرحلة من مراحل عمره وكما مبين بالتخطيط التالي:



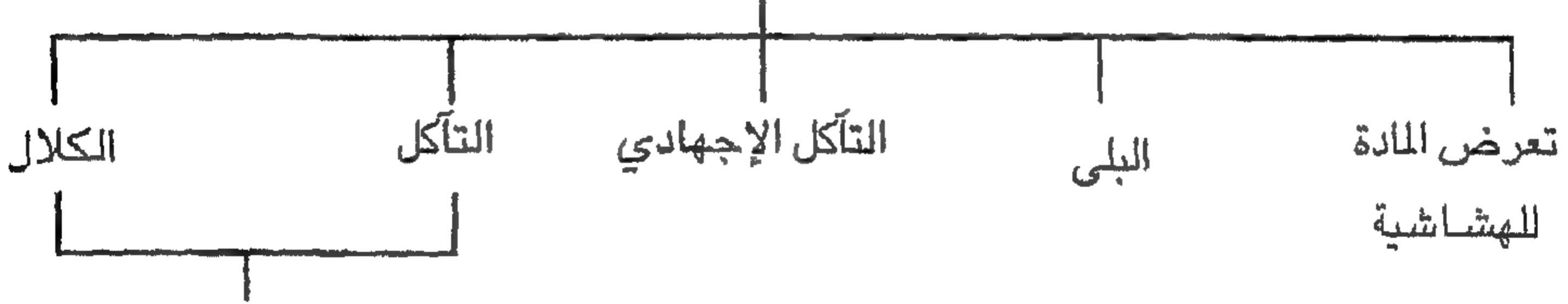
٢- مرحلة تصنيع الاجزاء: والعيوب المحتملة في هذه المرحلة هي:



٣- مرحلة تجميع الاجزاء: والعيوب المحتملة هنا هي:



٤- العيوب والتلف المتولد أثناء الخدمة والإستعمال وهي:



وعند اجتماع سببان تكون المشكلة أخطر كالكلال في محيط تآكلي

فلو أخذنا الفولاذ كأحد المواد الهندسية المهمة المستخدمة في الصناعة، ومع استثناءات قليلة ، فالمعدن إما أن يستخلص من خاماته أو من البقايا المنبوذة أو المستهلكة (الخردة Scrap) وفي العادة بالطريقتين، وكلتا الطريقتين تتضمن فصل المعدن من أكاسيده وعزله عن الشوائب الأخرى أثناء عملية الصهر. يظل المعدن المنصهر محتويًا على نسبة من الشوائب وبعضها هي التي تسبب العيوب في المنتج النهائي.

وبالإضافة الى الشوائب آنفه الذكر فإن أغلب المعادن المنصهرة تتقلص أو

تنكمش أثناء عملية التجمد (عند تحول السائل الى صلب) وهذه الخاصية قد تولد فجوات أنبوبية او مناطق مسامية او شقوق.

هناك عيوب ذات طبيعة صفائحية ناتجة في الغالب من طي الغشاء الرقيق الموجود عادة على سطح المعدن أثناء عملية التشكيل. حيث تدخل هذه الأغشية الاوكسيدية داخل القطعة المعدنية لتؤدي الى نقصان مقاومتها ومن ثم أنهيها أثناء الإستخدام.

تنشأ عيوب جديدة غالباً في مرحلة تصنيع وتجميع الاجزاء وخاصة إذا استعمل اللحام في هذه المرحلة. فيمكن ان ينحصر الخبث والفجوات الغازية أثناء عملية اللحام وما يصاحب ذلك من تشوه وتشقق ناتجين عن الحرارة العالية والصهر الموضعي إضافة الى الإجهادات المتخلفة نتيجة لذلك. وأخيراً بالنسبة الى تأثير الخدمة والإستعمال على العيوب المتولدة في الجزء ، فهناك على سبيل المثال التآكل (Corrosion) وهو عيب شائع جداً إلا أن الكسر أو الإنهيار الذي يصيب الأجزاء أثناء الخدمة غالباً ما يكون سببه الكلال. فالشقوق إذن من أخطر العيوب التي تؤدي الى الإنهيار إذا تركت تنمو، لذلك يجب التحري والتفتيش عنها جيداً بطرائق لائتلافية طبعاً. وتزداد الخطورة أثناء الإستخدام إذا اجتمع أكثر من عامل من العوامل التي تؤدي الى نشوء العيوب، ككلال التآكل (هو الكلال عندما يكون الجزء في محيط يتفاعل معه بشكل او آخر) أو التآكل الإجهادي (هو التآكل عندما يكون الجزء تحت تأثير أجهاد ما سواء كان خارجي أم داخلي) ، فحينئذ يكون عمر الجزء أقصر بالطبع.

٤-١ طرائق الفحص اللا ائتلافي :

يمكن تقسيم طرائق الفحص بشكل عام الى نوعين من الفحوص تبعاً لتأثير عملية الفحص على الجزء المفحوص وهي :

- ١- طرائق الفحص اللا ائتلافيه ، وهي الطرائق التي لا يمكن استخدام الجزء بعد الفحص للغرض المصمم من أجله في لغلب كفحوص المجهر الإلكتروني سواء النافذ او الماسح والمجهر الضوئي والتحليل الكيماوي وأغلب الفحوصات الميكانيكية وحيود الأشعة السينية وغيرها.

٢- طرائق الفحص اللاإتلافية، والتي نحن بصددھا في هذا الفصل، وقد مرّ تعريفھا في البداية. أنه قد يتبادر الى الذھن أنها الطرائق التي تكشف العيوب فقط كالشقوق وغيرها، وفي الحقيقة يمكن استخدامها لأبعد من ذلك فتستخدم في دراسة النواحي المتعلقة بالنوعية وتجانس المواد سواء من الناحية الفيزيائية او الكيماوية فهي بحق فرع من فروع علم المواد. وأهم الطرائق الشائعة الإستخدام في الفحص هي:

١- طريقة المعاينة البصرية Visual Technique

٢- طريقة السوائل المتغلغة Liquid Penetrant

٣- الفحص بالدقائق المغناطيسية Magnetic Particle test

٤- الطريقة الشعاعية Radiography ويمكن استخدام عدة تقنيات هي:

أ- الأشعة السينية X-rays

ب- أشعة كاما Gamma - rays

ج- التشعيع بالنيوترونات Neutron radiography

٥- طريقة التيارات الدوامة Eddy current

٦- الفحص بالموجات فوق السمعية Ultrasonic Test

وهناك الكثير من طرائق الفحص اللاإتلافي الأخرى أقل شيوعاً أو تستخدم في حالات خاصة ومنها:

١- انبعاث الأمواج السمعية وفوق السمعية Acoustic and ultrasonic Emission

٢- الفحص الحراري Thermal Test

٣- المقاومة الكهربائية Electrical Resistance

٤- الأمواج الدقيقة (الميكروويف) Microwaves

٥- التداخل الصوري المجسم Holography

وقد يكون هناك طرائق أخرى في دور التطوير والأعداد وحسب ما تتطلبه المواد والأجزاء الهندسية المستحدثة. إلا أنه من الجدير بالذكر أن لكل طريقة من طرائق الفحص مزاياها ومحدودياتها (قصورها)، لذلك يجب الانتباه الى اختيار الطريقة الأمثل لفحص الجزء المعين اعتماداً على خواص الجزء و مزايا الطريقة او حسب توصية المصمم إن وجدت. وبما أن لكل تقنية من تقنيات الفحوص اللا اتلافية مزايا ومثالب، كما ذكرنا للتو، فهي قد تصلح لبعض المواد ولا تصلح لمواد أخرى او قد تصلح لنوع معين من العيوب ولا تصلح لعيوب أخرى وهكذا. لذلك من المفروض بالفاحص الإطلاع على أغلب ان لم يكن كل طرائق الفحص وخصوصاً المؤلف منها، ليتسنى له اختيار الطريقة الأمثل لفحص الجزء او المنتج المطلوب، وذلك لتلافي الهدر في الوقت والمال اضافة الى الحصول على المعلومات المطلوبة وبالدقة المتوخاة. ومن الجدير بالذكر ان لخبرة الفاحص أثر فاعل في تحليل النتائج ومن ثم البت في صلاحية الجزء او عدمه، لذلك كان للتدريب و الممارسة الدور الكبير في عملية الفحص اللا اتلافية بشكل عام.

اما الغاية من الفحوصات اللا اتلافية فأهمها:

- ١- المحافظة على سلامة المنتج والسيطرة على توعيته.
- ٢- المحافظة على سلامة العاملين او من لهم علاقة بذلك والأدوات و حتى سلامة المنشآت والمباني.
- ٣- توفير الأموال والمواد بصورة عامة.

يعتبر الجدول (١-١) كدليل الى الفحوصات اللا إتلافية الشائعة.

١-٤-١ طريقة المعاينة البصرية:

ان أهم وسيلة في الفحوصات اللا إتلافية هي العين البشرية ولذا تكون الأدوات البصرية المساعدة هنا من الأهمية بمكان.

تتباين هذه الأدوات من مرايا صغيرة مثبتة على ذراع نحيف (كتلك التي

جدول ١-١ الدليل الى الفحوص اللاإتلافية

التقنية	متطلبات التحقيق	الكلفة الكلية للجهاز	كلفة الفحص	الملاحظات
المعاينة البصرية	بالإمكان استخدامها لرؤية دواخل الأجهزة المعقدة ، يكفي لهذا الغرض مكان واحد يوصل الى الداخل.	B/D	D	متعددة الاستخدام بكثرة ، تتطلب مهارة قليلة، تؤخذ في الاعتبار متطلباتها عند التصميم.
الشعاعية	يجب الوصول الى جانبي الجزء.	A	B/C	بالرغم من ارتفاع الكلفة ، يمكن فحص مساحة كبيرة أنياً، تتطلب مهارة متوسطة عند تحليل الصورة.
السوائل المتغلغة	ان تكون العيوب على اتصال مع السوائل النافذة (أي انها تظيفة عند السطح)	D	C/D	تصلح لكل المواد عدا مسامية القوام وللشقوق السطحية فقط، تتطلب بعض المهارة وهي ملوثة نسبياً.
التيارات الدوامة	يجب ان يكون السطح في العادة ناعم ونظيف نسبياً	B/C	C/D	تصلح للتشققات السطحية أو العيوب القريبة من السطح، والتغير في سمك طبقات الطلاء والمفارقة بين المواد، أما فيما عدا ذلك فتتطلب مهارة نسبية.
الدقائق المغناطيسية	تتطلب سطح ناعم ونظيف بصورة مقبولة.	D	C/D	تصلح للمواد المغناطيسية فقط كالفلواز، وللعيوب السطحية والقريبة من السطح، تتطلب مهارة قليلة.
الموجات فوق السمعية	ممكنة عند الوصول الى جانب أو كلا الجانبين أو النهايتين.	B	B/C	تتطلب فحص نقطة فنقطة، لذلك تكون ذات كلفة عالية عند فحص التراكيب الكبيرة، تتطلب مهارة وخبرة عند الفاحص.

ملاحظة: ان الكلف المشار اليها بالحروف A و B و C و D تعتبر مؤشرات تقريبية وهي :

A اكثر من 20000 دولاراً أمريكياً و B بين 4000 الى 20000 دولاراً أمريكياً و C بين 400 الى 4000 دولاراً أمريكياً و D اقل من 400 دولاراً أمريكياً.

يستخدمها أطباء الأسنان) الى كاميراتٍ مسيطر عليها آليا ، حيث أن قسماً منها ذو قطر أقل من 15 ملم ويمكن ادخالها من خلال فتحات الأنابيب الصغيرة لفحص السطوح الداخلية للتجاويف، شكل 1-1 .

تكمن أهمية الأدوات الضوئية هذه في قابليتها على فحص بعض السطوح التي من دونها قد يكون الوصول اليها صعباً جداً. وتتضمن الأمثلة على الفحص بهذه التقنية ما يأتي:

أ- ريش التوربين او مافي دواخل الجهاز الحارق في الطائرات او المحركات النفاثة في السفن.

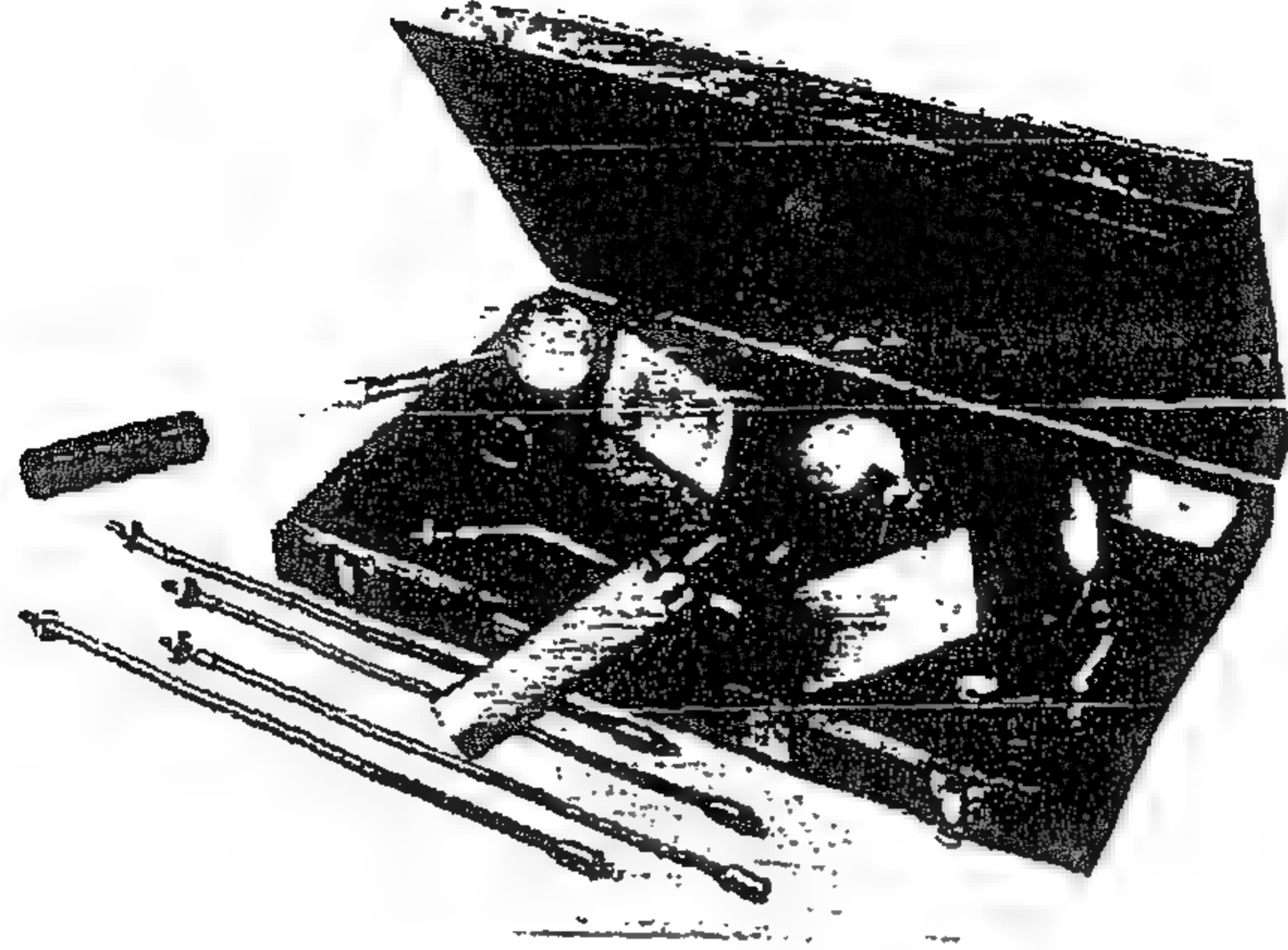
ب- رؤوس الإسطوانات وصمامات محركات الاحتراق الداخلي.

ج- تجاويف انابيب المراحل.

يمكن توفير الوقت وتجنب الازعاج عند فتح دواخل المكائن (الأجهزة) وفحصها إضافة الى فائدة أخرى وهي قلة دقائق الحطام التي تدخل الى الماكنة عند الفحص من خلال فتحة فحص على العكس مما لو أزيل كامل غطاء الماكنة.

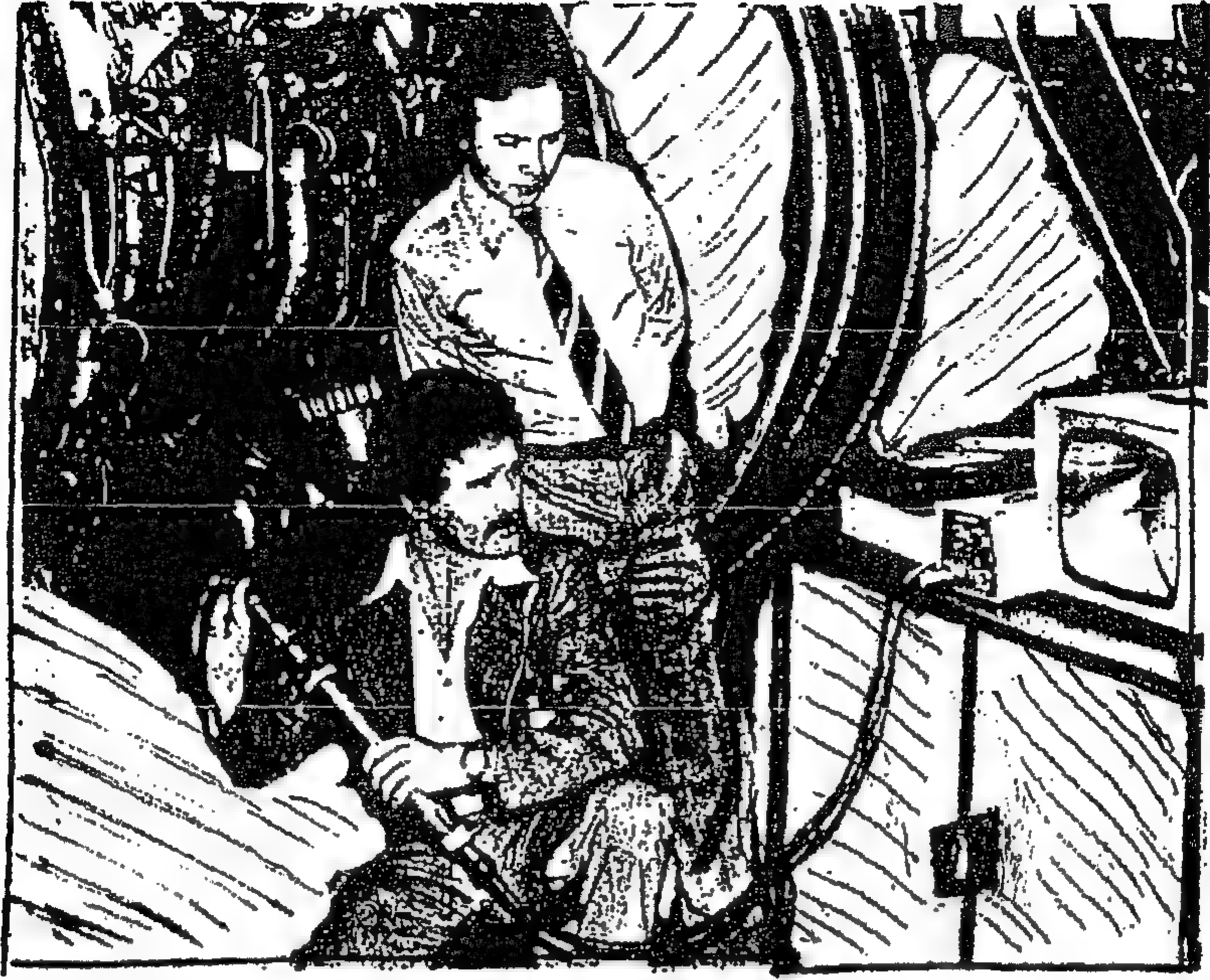
يمكن إنجاز المطلوب باستخدام مجموعة من الأذرع والمرايا والتي قد يصل طولها في الغالب الى 40 سم ويمكن امرارها حول الانحناءات البسيطة ، وإذا تطلب الامر مقداراً من التكبير للفحص أو أنه لم يكن الوصول الى كل المناطق المراد فحصها بواسطة مجموعة اذرع المرآة البسيطة فإن هناك أدوات أكثر تطوراً وتعقيداً تلائم معظم الحالات.

تتوفر أجهزة رؤية متينة تدعى اندوسكوب "endoscopes" . يبلغ قطرها بين 5-10 ملم وطولها من 150 ملم الى 1 m ، وذلك بوصل عدد من هذه الأدوات مع بعضها. يمكن تبديل العدسات في نهاية الأداة للنظر الى الأمام او الخلف أو الجانب. وبالإمكان استخدام هذه الأدوات مع العين المجردة وبواسطة آلة التصوير (الكاميرا) السينمائية أو التلفازية. يمكن ايصال الاضاءة من المصباح الصغير قرب العدسة العينية الى الشبكية أو المرآة عند الرأس بواسطة زجاج بلاستيكي او خلال حزمة من



شكل 1-1 مجموعة عتلات المرأة البسيطة

الألياف الضوئية (الزجاجية) حيث يمكن عندئذ السيطرة على اتجاه النظر من العدسة العينية والتي يمكن أيضاً إمالة أو إدارة النهاية لتوجيهها الى الأجزاء المعقدة من الجهاز المفحوص. كما أمكن ، في تطوير آخر لهذه التقنية، قسمة الألياف الضوئية الى مجموعتين أحدهما تخصص لنقل الإضاءة والأخرى لنقل الصورة ومن ثم تسجيلها على لوح ضوئي (فوتوغرافي) أو شاشة تلفازية أو أية وسيلة أخرى (الشكل 1-2). إلا أن كل الأدوات التي تساعد على النظر من بعيد تعاني من بعض العيوب أو القصور وذلك لأن من الصعب التفريق بين التغيرات والبثور (الحبابة) ما لم يتم عمل تظليل للسطح باستخدام مادة معينة ليتمكن الناظر (الفاحص) من تقييم اتجاه الضوء الساقط ومن ثم ماهية أو تضاريس السطح بشكل عام. هناك بعض العوامل المهمة التي يجب مراعاتها عند الفحص بالمعينة البصرية وهي:



شكل 1-2 الفحص بمجس الألياف الضوئية وبالإستعانة بالكاميرا التلفازية

- أ- يجب أن تكون الإضاءة جيدة وخالية من السطوع او التوهج.
- ب- يجب استخدام قدرة تكبير معقولة نسبة الى مساحة الجزء المراد فحصه. فقدرة تكبير اكثر من حوالي عشرة مرات يجب ان تستخدم باحتراس؛ وتستعمل قدرة تكبير اعلى لفحص العيب الذي عيّن مكانه مسبقاً وليس لإيجاد العيب نفسه.
- ج- ان التباين الجيد بين العيوب وأساس المادة شيء ضروري (وربما يساعد في ذلك الاظهار الملائم "Suitable etching").
- د- يجب ان تتوفر تسهيلات لمداولة وأسناد الأجزاء الثقيلة.
- هـ- يجب أن يكون الشخص الفاحص قادراً على الاشتغال بارتياح وبدون انفعال او انزعاج بدني.
- و- تحصل في بعض الأحيان عواقب مخيبة الآمال عندما لايمكن الانتباه بوضوح الى العيوب الموجودة.

٢-٤-١ طريقة السوائل المتغلغلة Liquid penetrant Technique

وقد تكون هذه الطريقة من أقدم الطرائق وأبسطها فقد كان يستخدم فيها زيت المحركات المستهلك كسائل نافذ ومسحوق الطباشير، على سبيل المثال، كمادة مظهره، وفي سنة ١٩٤١ طوّرت هذه الطريقة، فقد تمت الاستعاضة عن الزيت بمحاليل ملونة وذات مواصفات فيزيائية و كيميائية خاصة وفي بعض الحالات محاليل متألقة أيضاً وحسب طبيعة العيب. وقد استخدمت هذه التقنية بصورة واسعة في فحص مختلف المنتجات و لمواد متعددة. وبما أن هذه الطريقة تعتمد على نفوذ أو تغلغل السائل الى العيوب والتشققات الموجودة في السطح، فهي اذن لا تصلح إلا للعيوب السطحية فقط (أي التي لها فتحات عند السطح) . لكن هذه الطريقة تمتاز بكونها تصلح لجميع المواد والمعادن، عدا المواد المسامية القوام كالخشب والفخاريات. تصلح هذه الطريقة لكشف الشقوق والمسامات والطيات وعيوب اللحام كما يمكن فحص مناطق التسرب في الأنابيب والخزانات الى غير ذلك من العيوب السطحية. أما العيوب الداخلية أو القريبة من السطح (التي ليس لها منفذ الى السطح) فلا يمكن فحصها بهذه الطريقة.

يمكن تلخيص أسس الفحص وهي كالآتي:

- ١- تنظيف السطح من كل عائق كالأتربة والزيوت والدهون وغيرها.
- ٢- تسليط أو رش السائل الملون النافذ على السطح المراد فحصه.
- ٣- الانتظار فترة من الزمن تتراوح بين 5-60 دقيقة ليتمكن السائل من التغلغل داخل العيوب من خلال الفتحات الموجودة في السطح. والجدول (1-2) يبين الوقت اللازم لمختلف العيوب والمواد.
- ٤- ازالة الفائض من السائل عن السطح.
- ٥- تسليط أو رش مسحوق فاتح اللون (أبيض في الغالب) مغاير للون السائل ويسمى بالمظهر. وهذا المظهر سيمتص السائل المتخلف في العيوب ويسحبه نحو

جدول (1-2) فترة الانتظار لتغلغل السائل المتألق

أ- للسوائل القابلة للذوبان في الماء

المادة	هيئتها	نوع العيوب	زمن التغلغل بالدقيقة
الألمنيوم	مصبوبات مطروقات	مسامية وعدم التلاحم الثنيات	5-15 30
	ملحومات	عدم تمامية الترابط والمسامية	30
	كل الهيئات	شقوق الكلال	30
المغنيسيوم	مصبوبات ومطروقات	مسامية وعدم التلاحم ثنيات	15 30
	ملحومات	عدم تمامية الترابط والمسامية	30
	كل الهيئات	شقوق الكلال	30
الفولاذ المقاوم للصدأ	مصبوبات مطروقات	مسامية وعدم التلاحم ثنيات	30 60
	ملحومات	عدم تمامية الترابط والمسامية	60
	كل الهيئات	شقوق الكلال	30
النشبة (Brass)	مصبوبات مطروقات	مسامية وعدم تلاحم ثنيات	10 30
والبرونز	الاجزاء الملحومة بالنشبة	عدم تمامية الترابط والمسامية	15
	كل الهيئات	شقوق الكلال	30
اللداثن	كل الهيئات	شقوق	30-5
الزجاجيات	كل الهيئات	شقوق	30-5
ادوات القطع		عدم تمامية الترابط والمسامية	30
ذات الرؤوس		شقوق التنعيم	10
الكارببيديه			
التيتانيوم			
والسبائك			
المقاومة			
لدرجات			
الحرارة			
العالية			

تستخدم فقط مع السوائل
غير القابلة للذوبان في الماء
بعد عملية الاستحلاب

جدول (1-2) فترة الانتظار لتغلغل السائل المتألق
ب- للسوائل غير القابلة للذوبان في الماء إلا بعد عملية الاستحلاب

المادة	هيئتها	نوع العيوب	زمن التغلغل بالدقيقة
الألنيوم	مصبوبات مطروقات ملحومات	مسامية وعدم التلاحم الثنيات عدم تمامية الترابط والمسامية	5 10 5
المغنيسيوم	كل الهيئات مصبوبات ملحومات مطروقات كل الهيئات	شقوق الكلال مسامية وعدم التلاحم عدم تمامية الترابط والمسامية ثنيات شقوق الكلال	10 5 10 10 10
الفولاذ المقاوم للصدأ	مصبوبات مطروقات ملحومات كل الهيئات	مسامية وعدم تلاحم ثنيات عدم تمامية الترابط والمسامية شقوق الكلال	10 10 20 20
الشبه والبرونز	مصبوبات مطروقات الملحومات بالشبه كل الهيئات	مسامية وعدم تلاحم ثنيات عدم تمامية الترابط ومسامية شقوق الكلال	5 10 10 10
اللداين	كل الهيئات	شقوق	2
زجاج	كل الهيئات	شقوق	5
ادوات القطع ذات الرؤوس الكاربيديه التيتانيوم	كل الهيئات	عدم تمامية في الترابط والمسامية شقوق التنعيم	5 20
والسبائك المقاومة لدرجات الحرارة العالية		كل العيوب	30-20

ملاحظة: عندما تكون سرعة الفحص غير مهمة، فمن المفضل ألا يكون زمن التغلغل أقل من ١٥ دقيقة.
استخدام هذا الزمن سيجعل بالإمكان سحب أقصى كمية من السائل المتغلغل في العيوب، إضافة إلى منعه
لتلوث المستحلب مع السائل المتغلغل.

السطح بواسطة الخاصية الشعرية . وبذلك ترتسم صور العيوب في المظهر ولكن بشكل أكبر بكثير من الحجم الحقيقي للعيب .

٦- ملاحظة هذه العيوب وتعيين شكلها ومكانها ومن ثم تحديد رفض او قبول هذا المنتج حسب نوع العيب ومكانه وشكله . لأنه ليس من الضروري رفض كل مفتوح فيه عيب فهناك عيوب مقبولة عند تواجدها في بعض المنتجات اي عندما لا يؤثر وجودها على العمل المصممة من أجله تلك المنتجات .

أنواع وخواص السوائل النافذة والمساحيق المظهرة:

يمكن القول بأن أغلب السوائل تدخل او تتغلغل الى أغلب العيوب السطحية تبعاً لسعة فتحة العيب، وأن كل المساحيق ذات الألوان الفاتحة والحبيبات الناعمة تصلح أن تكون مساحيق مظهره وذلك عندما تكون فتحات العيوب السطحية كبيرة نسبياً. إلا أن تحقيق حساسية عالية وخصوصاً للفتحات الصغيرة جداً يتطلب سوائل ذات قدرة عالية على النفوذ وذات صبغة داكنة (غامقة) لتعطينا تبايناً عند وضع المسحوق المظهر. وتجدر الملاحظة بأن كمية المحلول التي ستدخل الى العيوب الصغيرة جداً ستكون قليلة أيضاً لذلك من المفروض استخدام مساحيق مظهره (ذات قابلية امتصاص عالية) لإمتصاص أكبر كمية ممكنة من السائل الداخل الى العيب ليتمكن رؤيته بوضوح اما تحت الضوء الأبيض (الإعتيادي) او تحت الضوء الأسود (الذي هو الجزء الأطول من طيف الأشعة فوق البنفسجية والذي يقدر طوله الموجي بحوالي 360 نانوميتر) إذا كان السائل المتغلغل متألّقا (Fluorescent) .

تقسم السوائل النافذة الى نوعين:

أ- السوائل المتألقة تحت الضوء الأسود.

ب- السوائل التي تبدي تبايناً لونياً تحت الضوء الأبيض.

أما التصنيف الآخر فحسب كيفية إزالتها من سطح النموذج المراد فحصه فالمجموعة الأولى هي التي يمكن إزالتها بالماء او ببعض المذيبات بسهولة، أما المجموعة الثانية فهي السوائل التي لا يمكن إزالتها بالماء بحد ذاتها لكنها تزال بالماء

بسهولة بعد وضع بعض المستحلبات عليها حيث تتفاعل مع الزائد من السائل ويتم ذلك بعد عملية تغلغل السائل الى العيب طبعاً.

يمكن تقسيم المظهرات الى نوعين أيضاً

أ- المظهرات الجافة، وهي مساحيق ذات اللون فاتحة وطريقة استخدامها هي أما ان يغمر الجزء المراد فحصه في وعاء يحتوي على المسحوق او أن تتم تذرية المسحوق على الجزء بواسطة منفاخ هوائي ومن الممكن أيضاً استعمال فرشاة ناعمة وذلك بغمرها في المسحوق ثم طلاء الجزء به.

ب- المظهرات الرطبة وفي هذه الطريقة يكون المسحوق عالقاً في سائل ما كالماء او بعض السوائل المتطايرة وقد يكون على هيئة رذاذ (Spray). ومن ميزات النوع الرطب أنه يمكن استخدامه لأعداد كبيرة من الأجزاء وحتى الأشكال المعقدة ، إلا أنه يجب تجفيف الجزء المفحوص بواسطة تيار من الهواء الحار خصوصاً اذا كان المسحوق عالقاً في الماء اما بالنسبة الى السوائل الطيارة فالحاجة الى التجفيف بالهواء الحار قليلة.

يمكن ترتيب خطوات العمل كالآتي :

١- تنظيف السطح بصورة جيدة وإزالة جميع قشور الصدأ والأملاح والأصباغ و الشحوم والزيوت والأتربة وما الى ذلك من المواد التي تعيق السائل من النفوذ الى داخل الشقوق والعيوب الأخرى ، يتم ذلك بالميزيلات المعروفة كالماء وبعض الحوامض والقواعد والكحول والاسيتون ورابع كلوريد الكربون وغيرها.

٢- تسليط السائل النافذ على الجزء المراد فحصه ويتم ذلك اما بغمر الجزء في وعاء يحتوي على السائل او رش الجزء بالسائل وفي أحيانٍ قليلة تستخدم الفرشاة لطلي الجزء بالسائل، كما في الشكل 1-3.

٣- الإنتظار فترة من الزمن ليتغلغل السائل داخل العيوب ، وتعتمد هذه الفترة على :

أ- نوع السائل المستخدم.

ب- نوع وحالة المادة المفحوصة.

ج- الحساسية المطلوبة.

د- نوع العيب المبحوث عنه.

تتراوح هذه الفترة بين خمسة دقائق الى ساعة واحدة وفي خلال هذه الفترة يترك المنتج جانباً حيث يمكن استغلال الوقت في أعمال أخرى. والجدول 1-2 يبين فترة الانتظار للسوائل المتألفة على سبيل المثال،

٤- إزالة السائل الفائض إما بغسله بالماء او بالمزيلات الاخرى ويمكن انجاز ذلك بقطعة قماش مبللة إذا كان السطح ناعماً، الشكل 1-4 .

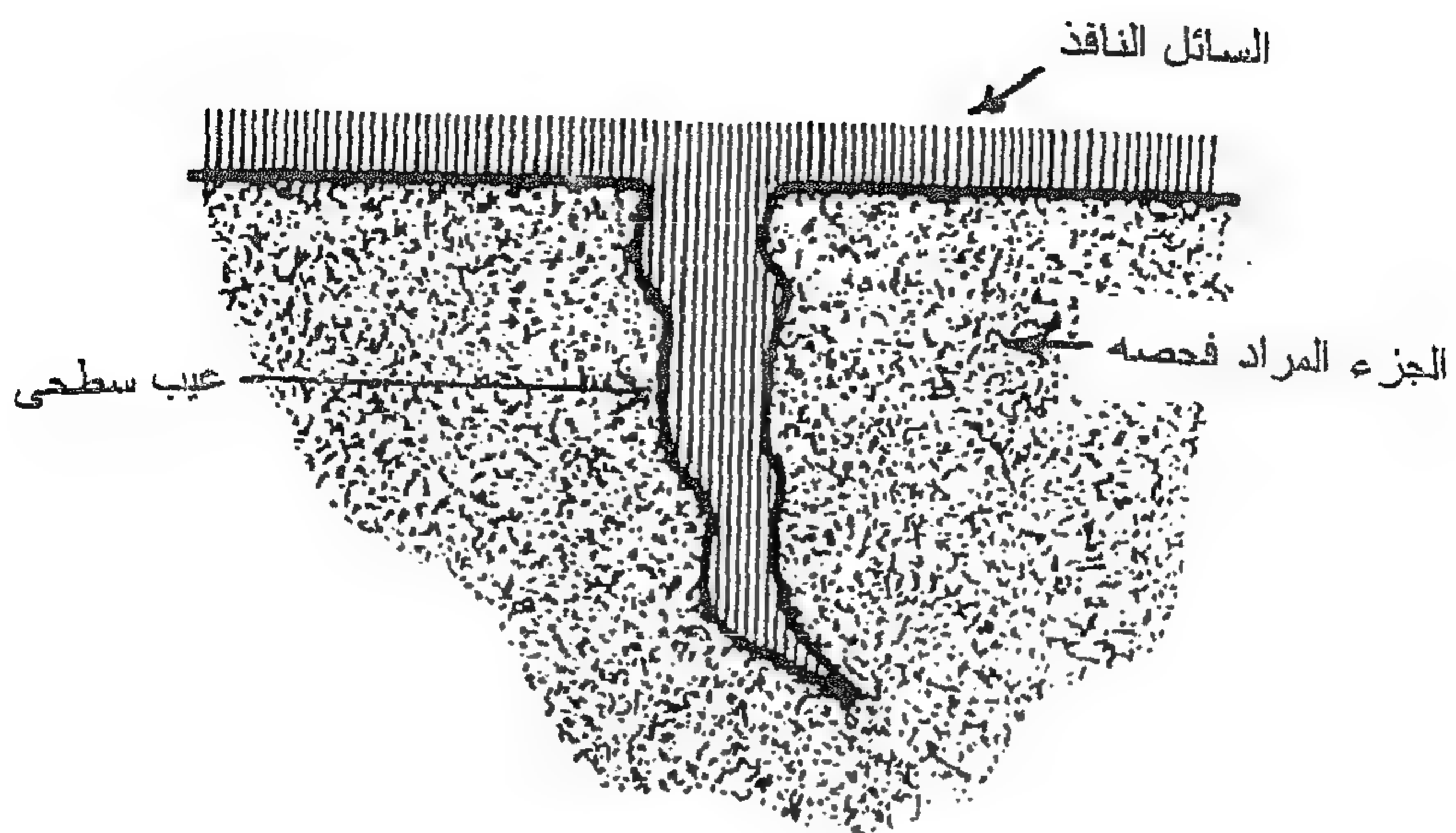
٥- تسليط او طلاء السطح بالمسحوق المظهر والذي يعمل على امتصاص السائل المتغلغل في العيوب وسحبه الى السطح لتتلوث المنطقة به حيث ترتسم معالم العيوب الموجودة، وبصورة مكبرة، على المسحوق الذي له لون ابيض او فاتح مغاير للون السائل الذي يكون ذو لون أحمر غامق أو أخضر.. الشكل 1-5.

يستحسن الانتظار فترة تساوي تقريباً فترة الانتظار لتغلغل السائل داخل العيوب وذلك لترتسم معالم العيوب في المظهر بصورة جيدة.

٦- فحص الأشكال والمعاليم التي رسمت جرّاء امتصاص السائل الملون من قبل المادة المظهرة. فإذا كان السائل ملوّناً باللون المرئي فيمكن فحصه تحت الضوء الأبيض الاعتيادي او تحت الضوء الأسود إذا كان السائل متألّقاً - يستخدم السائل المتألّق عادةً للكشف عن العيوب الصغيرة جداً، كالشقوق الدقيقة والمسامات ، الشكل 1-6.

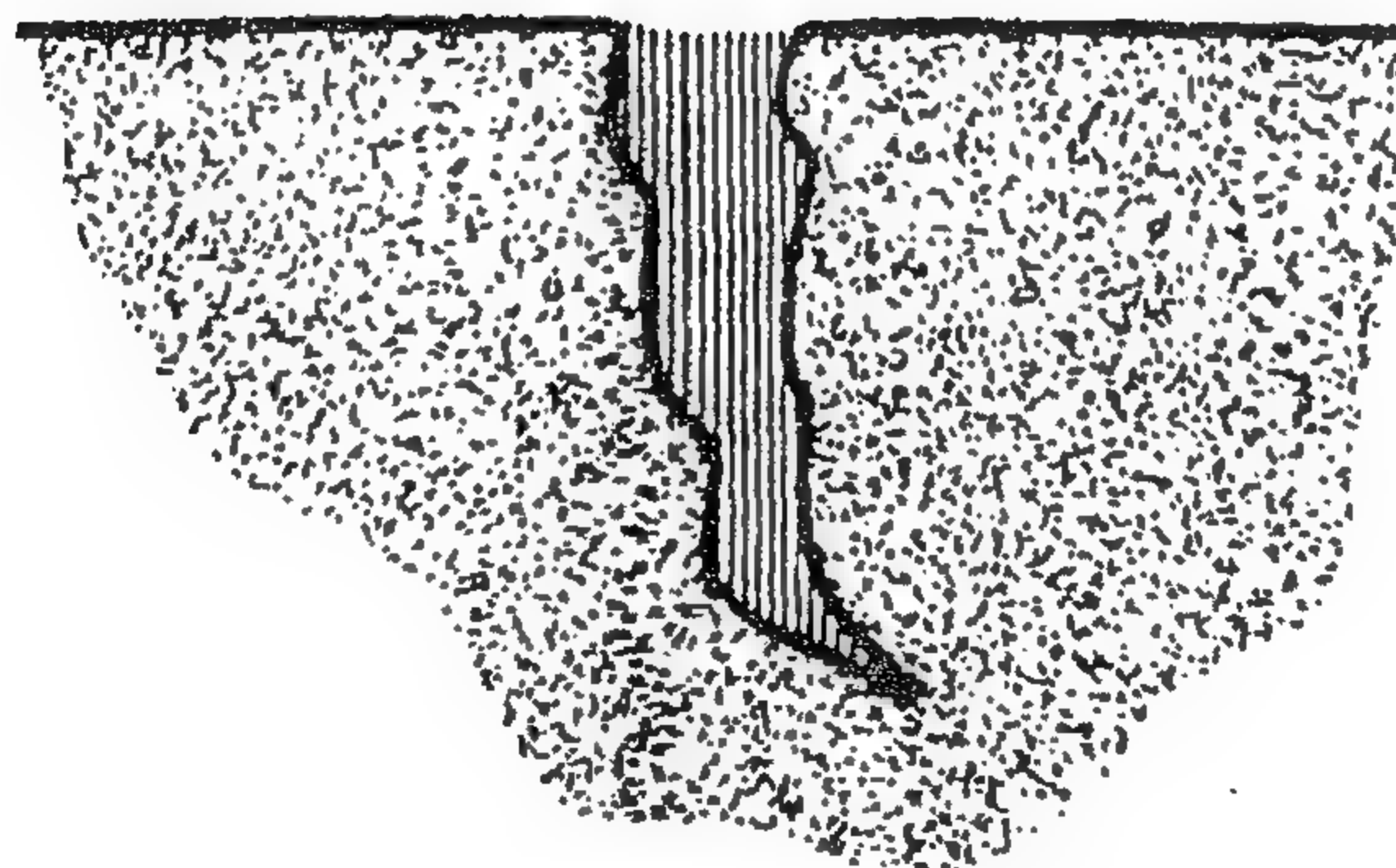
ومن المهم هنا ملاحظة مايلي:

١- يجب أن يدخل السائل النافذ الى العيب ليتمكن الكشف عنه. فمن الضروري إذن ان تكون العيوب نظيفة وخالية من المواد الملوثة وإلا قد لا يمكن الكشف عن العيب او قد تتفاعل هذه المواد مع السائل وتخفف لونه او تألقه كما أن من المحتمل ان تقلل هذه المواد والأوساخ من الخاصية الشعرية للسائل وبذلك تقل حساسية الكشف بهذه الطريقة.



السائل النافذ يغطي السطح وقد تغلغل داخل العيب.

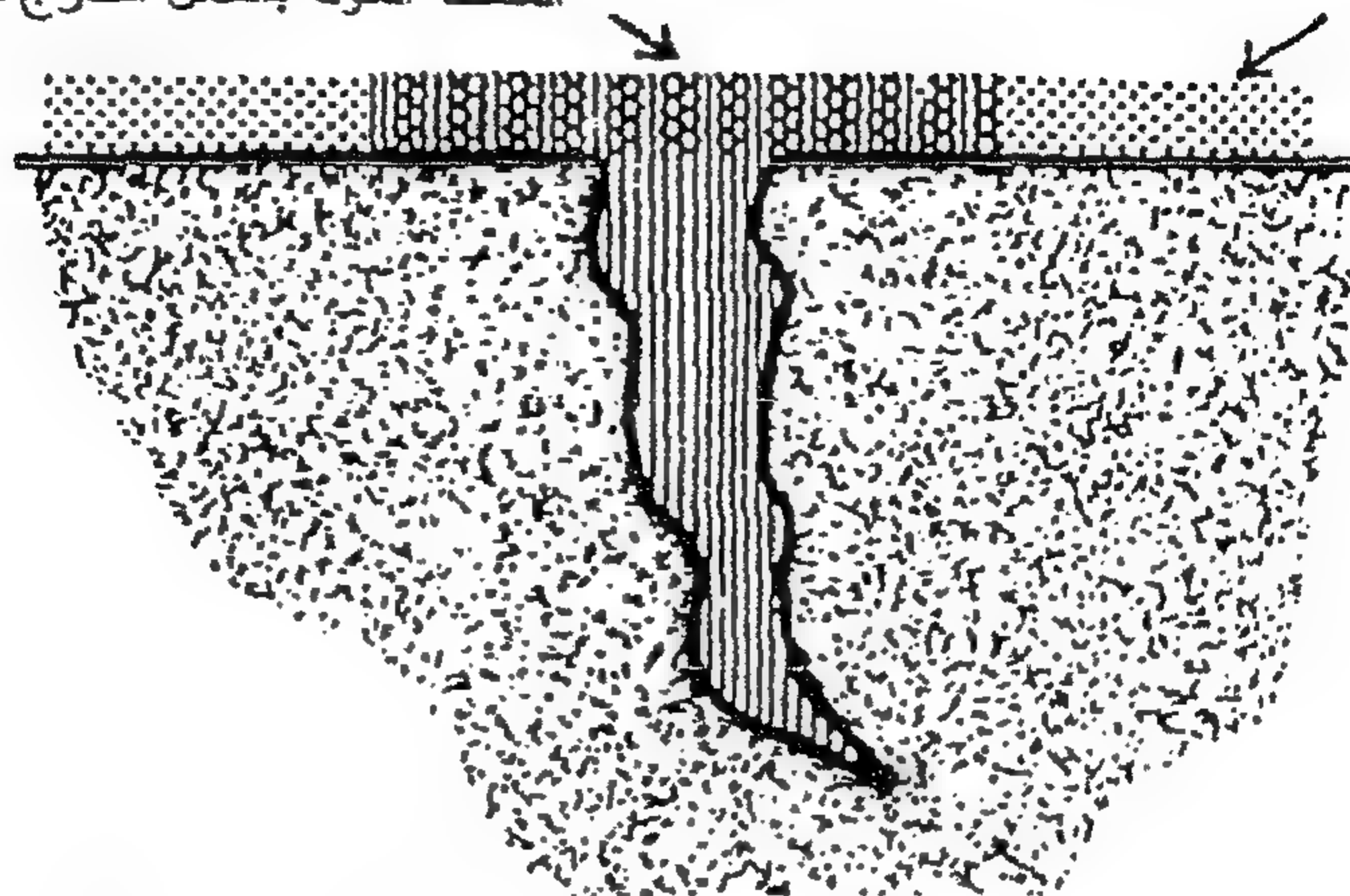
شكل 3-1



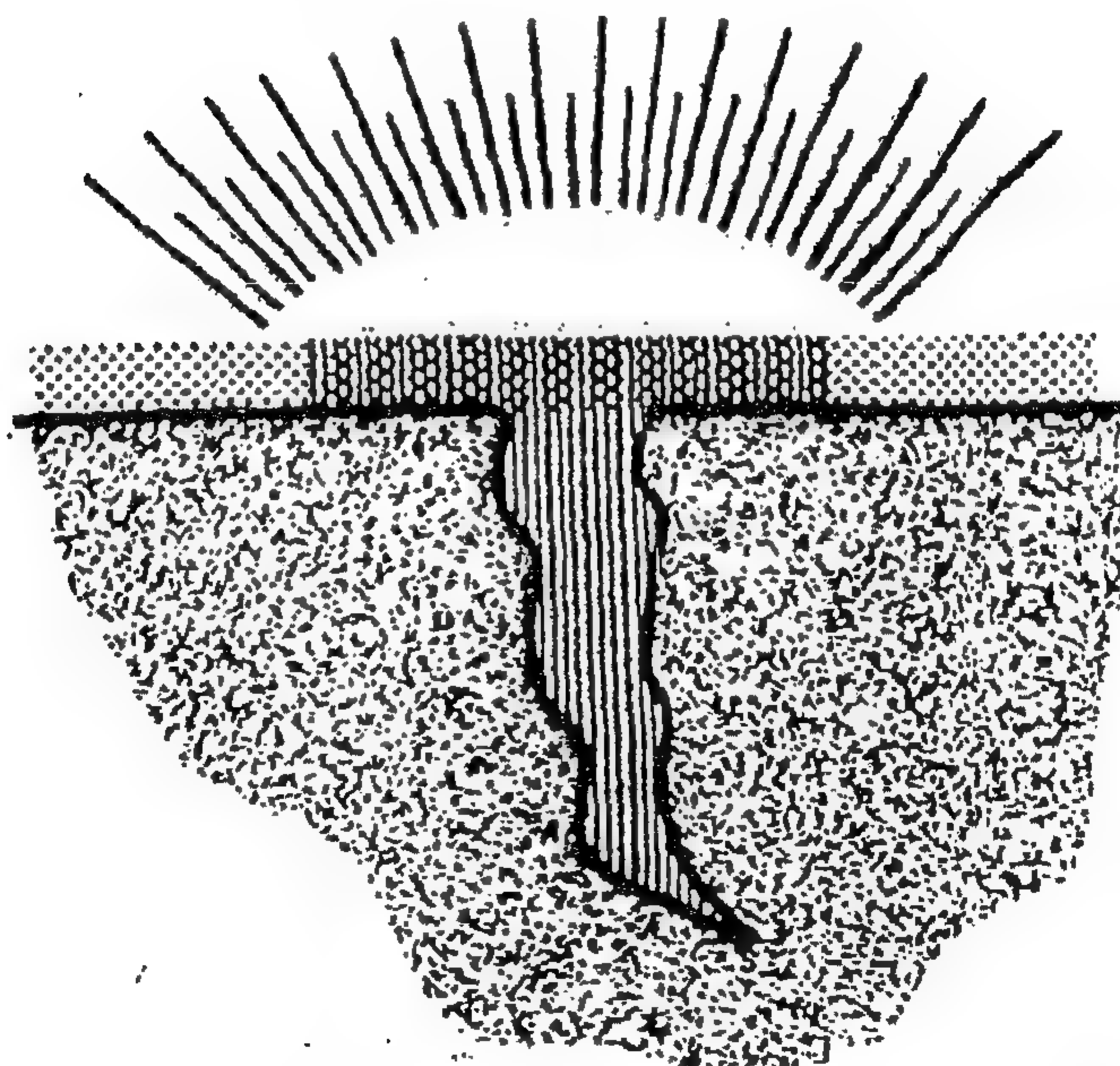
السطح وقد تمت إزالة السائل النافذ الزائد ،

شكل 4-1

المسحوق المظهر المنطقة الملوثة بالسائل الخارج من العيب



وضع المظهر على السطح وقد عمل على امتصاص السائل
النافذ وأظهر علامات وأشكال العيب شكل (5-1) *



الفحص تحت الضوء الأسود يحدث تالقا ملحوظا عند استعمال
السوائل المتألقة وخصوصا في المكان المظلم شكل (6-1) *

٢- لا يمكن إظهار العيوب إذا تمت إزالة السائل الداخل الى العيوب بتيار الماء عند غسل السطح لإزالة السائل الفائض، مع العلم أنه ليس من السهولة إزالة السائل النافذ حتى من الشقوق الضيقة وذلك لضعف قابلية الماء على النفوذ إلى الشقوق الضيقة، في حين لا يحدث ذلك في السوائل التي لا تتم إزالتها بالماء إلا إذا أضيف عليها بعض المستحلبات الخاصة.

٣- تتطلب العيوب الصغيرة والدقيقة وقتاً أطول لنفوذ السائل اليها حيث ستكون العملية أبطأ في حالة العيوب الصغيرة.

٤- يتطلب فحص العيوب العريضة ، اي التي يكون عمقها أقل من سعة فتحتها السطحية، تقنية خاصة لأن السائل النافذ سوف يزال عند غسل او تنظيف السطح من السائل النافذ الفائض ولذلك يتوجب استخدام السوائل التي لا تذوب بالماء ثم تسليط المستحلب الخاص عليه ،وبعد التفاعل مع الفائض من السائل فستكون مادة يمكن ازالتها بالماء بسهولة من السطح . أما السائل الداخل في العيوب فسوف يكون بعيداً عن المستحلب ولذلك سوف يبقى في العيوب غير العميقة حتى بعد غسل السطح. ومن محاسن السوائل غير الذائبة في الماء إلا باستعمال المستحلب (بعد عملية النفوذ) هي:

أ- أكثر حساسية للعيوب الدقيقة.

ب- تعطي نتائج مرضية في حالة العيوب الملوثة

ج- يمكن كشف العيوب غير العميقة (الضحلة) كالخدوش وعلامات التشغيل ، على سبيل المثال.

٣-٤-١ الفحص بطريقة الدقائق المغناطيسية Magnetic Particle Testing

وهي إحدى طرائق الفحص اللا اتلافي لفحص او تحسس الخل والعيوب الموجودة في المواد المغناطيسية على اختلاف أشكالها وحجومها. تتطلب هذه الطريقة مايلي:

١- تكوين مجال مغناطيسي ملائم في الجزء المراد فحصه .

٢- تعريض سطح الجزء المراد فحصه للدقائق المغناطيسية .

٣- فحص وملاحظة مناطق تجمع الدقائق على السطح ومن ثم تقدير صلاحية الجزء المفحوص للعمل المصمم من أجله .

تصلح هذه الطريقة لفحص العيوب السطحية والعيوب الموجودة تحت السطح مباشرة وإلى مدى محدود اعتماداً على الصفات المغناطيسية للجزء وشدة المجال المتولد . والطريقة ملائمة للمواد المعدنية التي يمكن مغنطتها جيداً، أما المواد غير المغناطيسية والتي لا يمكن مغنطتها بشكل جيد فلا يمكن فحصها بهذه الطريقة . ومعنى هذا أنه لا يمكن فحص الألمنيوم والمغنيسيوم والنحاس الأصفر والبرونز والرصاص والتيتانيوم وغيرها من المواد غير المغناطيسية .

يلزم في هذه الطريقة أن تكون الأجزاء المفحوصة نظيفة وخالية من الدهون والأكاسيد وما شابه ذلك، حيث تعتمد هذه الطريقة على قابلية الدقائق على الحركة استجابة لتأثير المجال المغناطيسي المتسرب (Leakage Magnetic Flux) الناتج بسبب العيوب الموجودة .

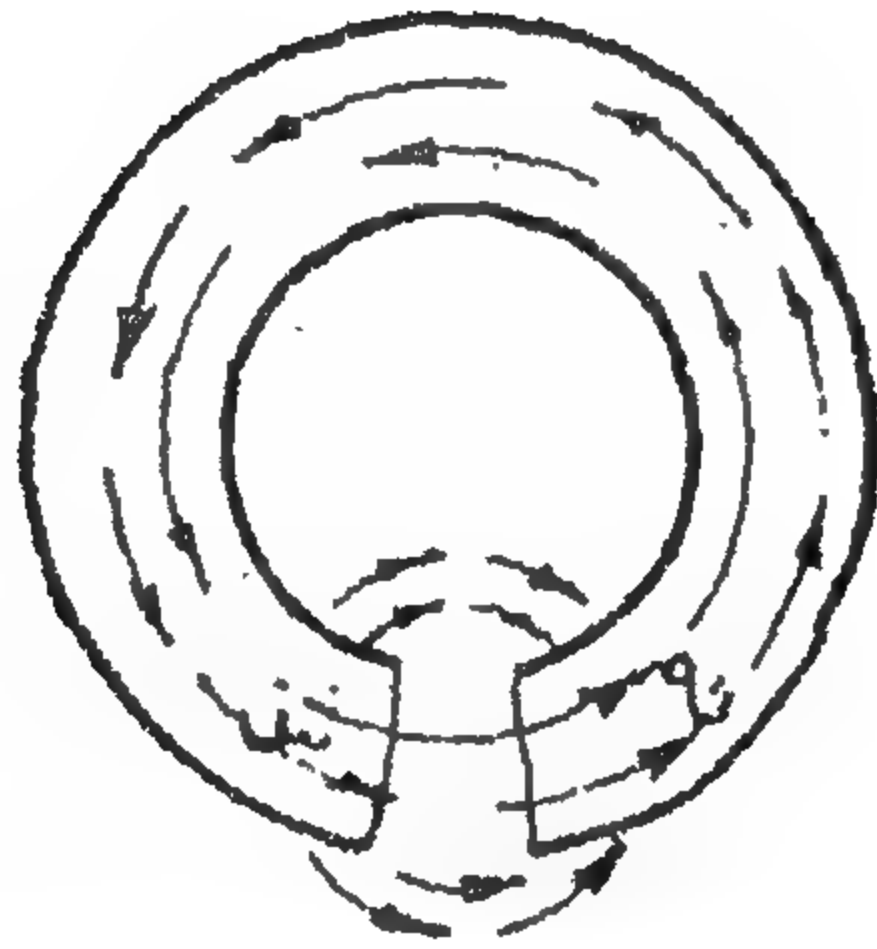
يلزم تدرية الدقائق المغناطيسية بواسطة منفاخ هوائي مطاطي صغير أثناء الفحص ، في حالة الطريقة الجافة، وعندها يجب أن يكون الجزء تحت الفحص جافاً أيضاً. أما في الطريقة الرطبة، فيتم حل الدقائق ، التي تكون بدورها على هيئة معجون ، في سائل شفاف كالماء أو الزيت حيث تبقى عالقة فيه، وذلك لتسهيل حركة الدقائق عند تعرضها للمجال المغناطيسي .

خواص المجال المغناطيسي Properties of Magnetic Field

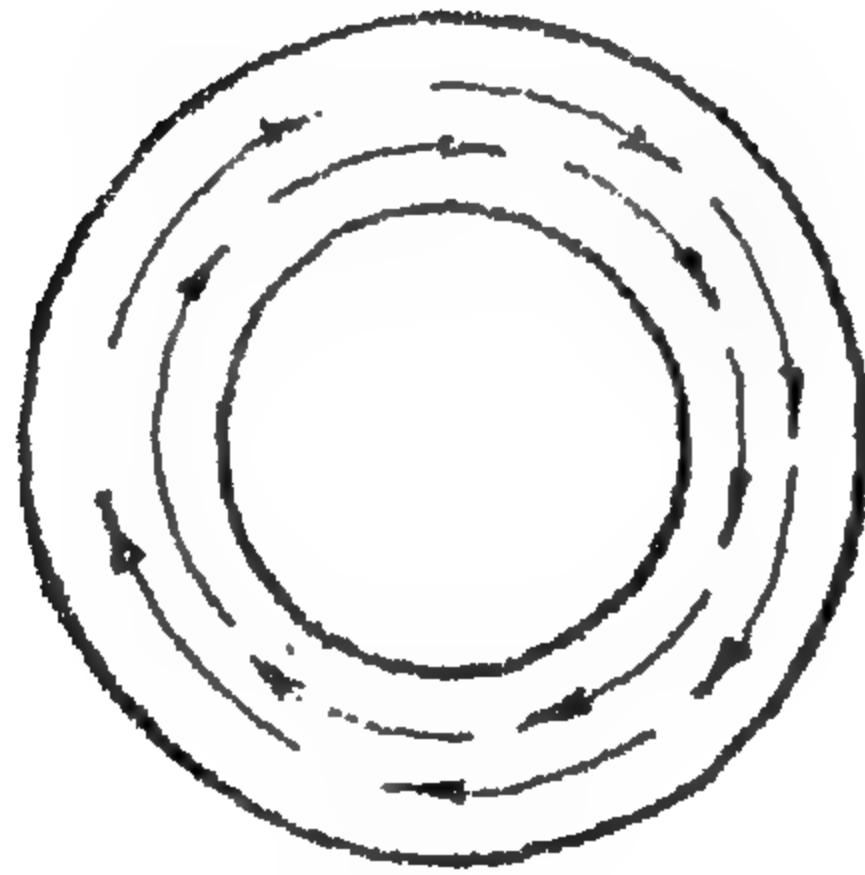
من المعلوم أن المغناطيس على شكل خذاء القوس يجذب المواد المغناطيسية إلى نهايتيه (قطبيه). لقد تم فرض أن خطوط القوى المغناطيسية أو الفيض تتجه من القطب الجنوبي نحو القطب الشمالي داخل المغناطيس وتخرج من القطب الشمالي لتدخل إلى الجنوبي عند القطبين (خارج المغناطيس). فعند وضع قضيب من مادة

مغناطيسية (قابلة للتعغنط) ليصل بين قطبي حذاء الفرس ، فستمر كل خطوط الفيض خلال القضيب بدلاً من مروره خلال مادة غير مغناطيسية كالهواء ، على سبيل المثال، وبذلك ينجذب القضيب نحو القطبين.

يبين الشكل 7-1 مسار المجال المغناطيسي داخل حلقة ممغنطة مفتوحة (أي أن هناك فجوة بين الطرفين)، كما يبين الشكل 8-1 مسار المجال داخل حلقة ممغنطة مغلقة. يلاحظ من الشكلين كيف أن مسار الفيض المغناطيسي يتشوه عند مروره في الهواء لإكمال الدورة.



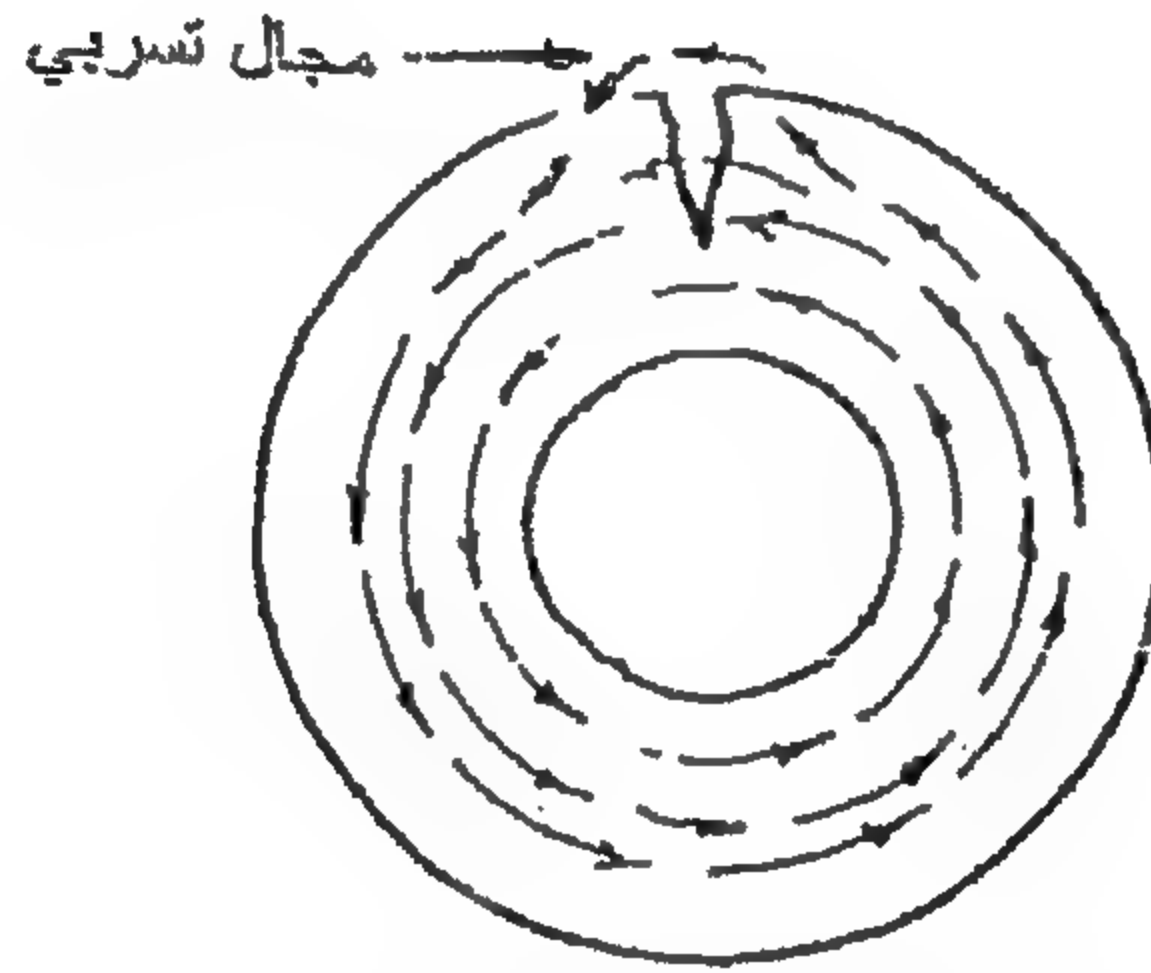
المجال المغناطيسي في حلقة ممغنطة مفتوحة .
شكل (7-1)



المجال المغناطيسي في حلقة ممغنطة مغلقة .
شكل (8-1)

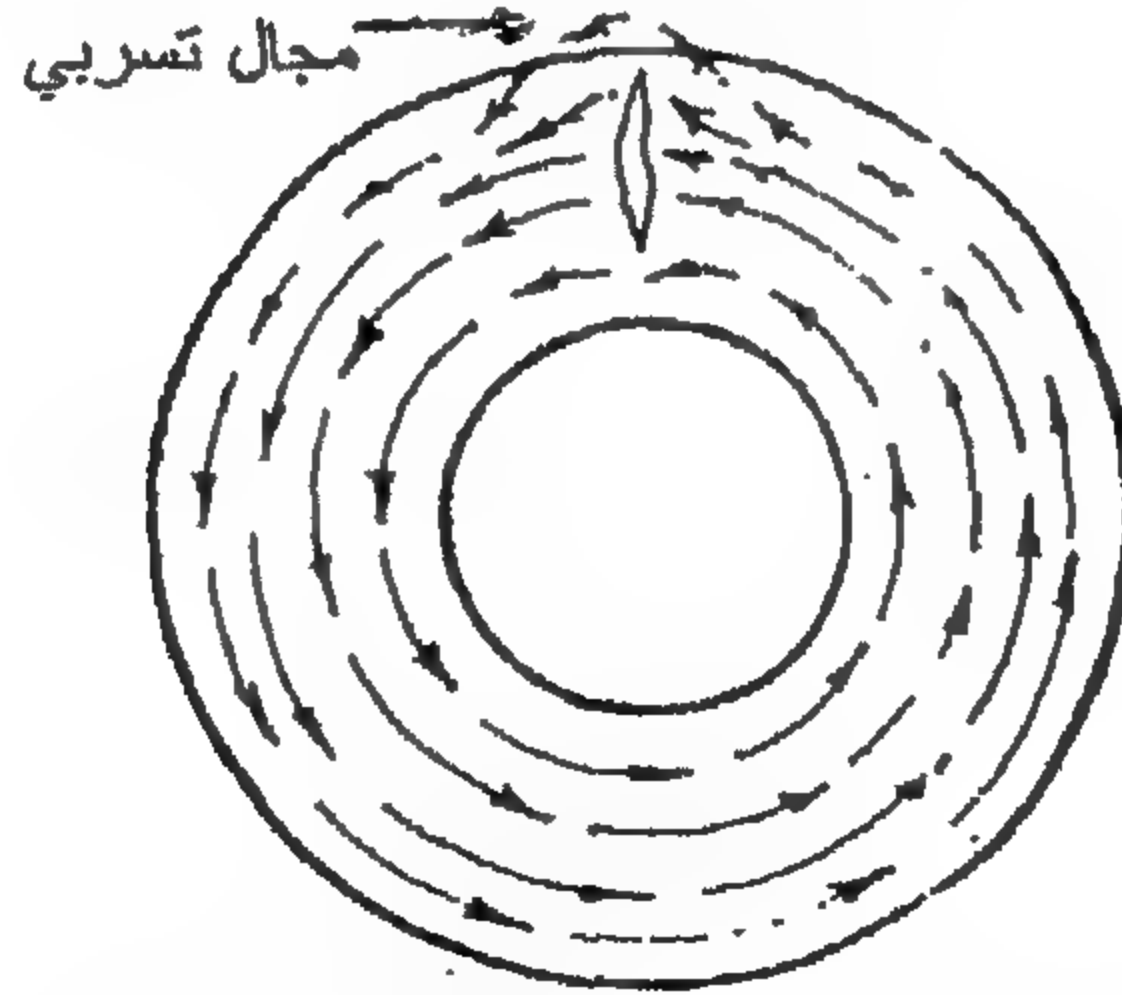
تأثير الشق او الصدع في الحلقة المغنطة:

يتولد على جانبي الشق العمودي على إتجاه المجال المغناطيسي قطبان مغناطيسيان احدهما شمالي والآخر جنوبي. وهذا بدوره سوف يجعل خطوط القوى المغناطيسية تمر خارج المعدن، اي تخرج من قطبه الشمالي لتدخل الى قطبه الجنوبي، وهذا ما يدعى بالفيض المتسرب. لذلك سوف تنجذب الدقائق المغناطيسية الى القطبين المتولدين على حافتي الشق لتشكل علامة ظاهرة تدل على وجود الشق او العيب ، الشكل 9-1.



المجال المغناطيسي لحلقة ممغنطة فيها شق عمودي على اتجاه المجال
الشكل (9-1)

اما بالنسبة لوجود عيب أو اكتنافات غير معدنية (inclusions) تحت السطح فسوف تؤدي الى حدوث فيض متسرب ايضاً إلا إذا كان العيب في الداخل بعيداً عن السطح فيضمحل الفيض المتسرب (المتشوه) كلما أبتعد العيب عن السطح كما في الشكل 10-1.



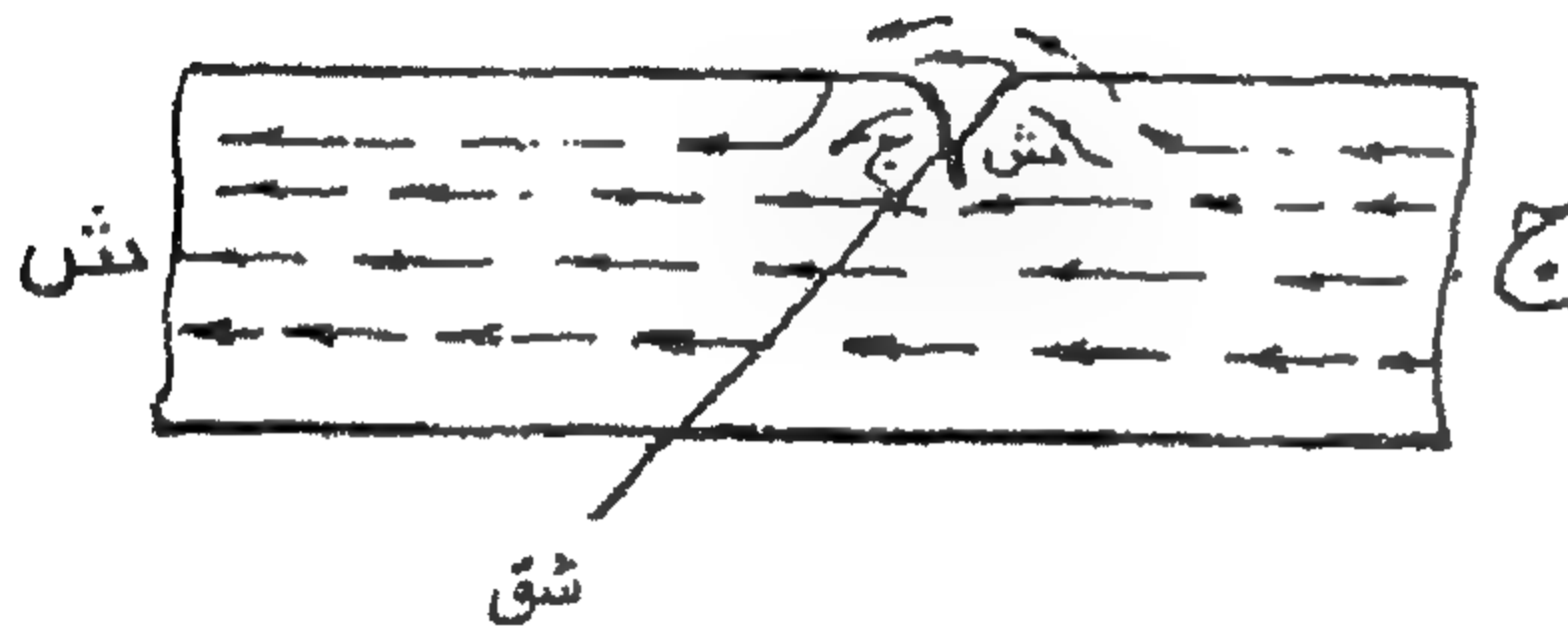
المجال المغناطيسي لحلقة ممغنطة فيها
شق تحت السطح مباشرة الشكل (10-1)

تأثير الشق في قضيب مغناطيسي:

لو تصورنا ان مغناطيس حذاء الفرس قد تم تعديله ليكون قضيباً مستقيماً فستكون خطوط القوى المغناطيسية ماره خلال القضيب وموازيه لمحوره الطولي وهذا ما يدعى بالمغنطة الطولية.

فلو حدث شق في سطح هذا القضيب المغناطيسي فسوف تنشوء مسارات خطوط القوى المغناطيسية نتيجة لذلك وسينشأ قطبان مغناطيسيان على طرفي الشق (وبشكل يشابه الشق الحاصل في الحلقة المغنطة) وستنجذب الدقائق المغناطيسية لهذين القطبين لقلنا على وجود شق في القضيب، الشكل 11-1 .

تعتمد شدة المجال عند هذين القطبين على عدد خطوط القوى المغناطيسية التي تقطع هذا الشق وتتأثر به بوحدة المساحة. ولذا فالشق الذي يكون عمودياً على اتجاه هذه الخطوط سوف يقطع ويؤثر من ثم على أكبر عدد ممكن منها وبذلك سيتولد قطبان مغناطيسيان أقوى من القطبين اللذين يولدهما شق مشابه للأول لكنه يوازي خطوط القوى المغناطيسية.



مجال مغناطيسي
طولي في قضيب
يحتوي على شق
الشكل (11-1)

اذن يكون حجم تجمع الدقائق أكبر مايمكن عندما يكون الشق عمودياً على اتجاه خطوط القوى المغناطيسية.

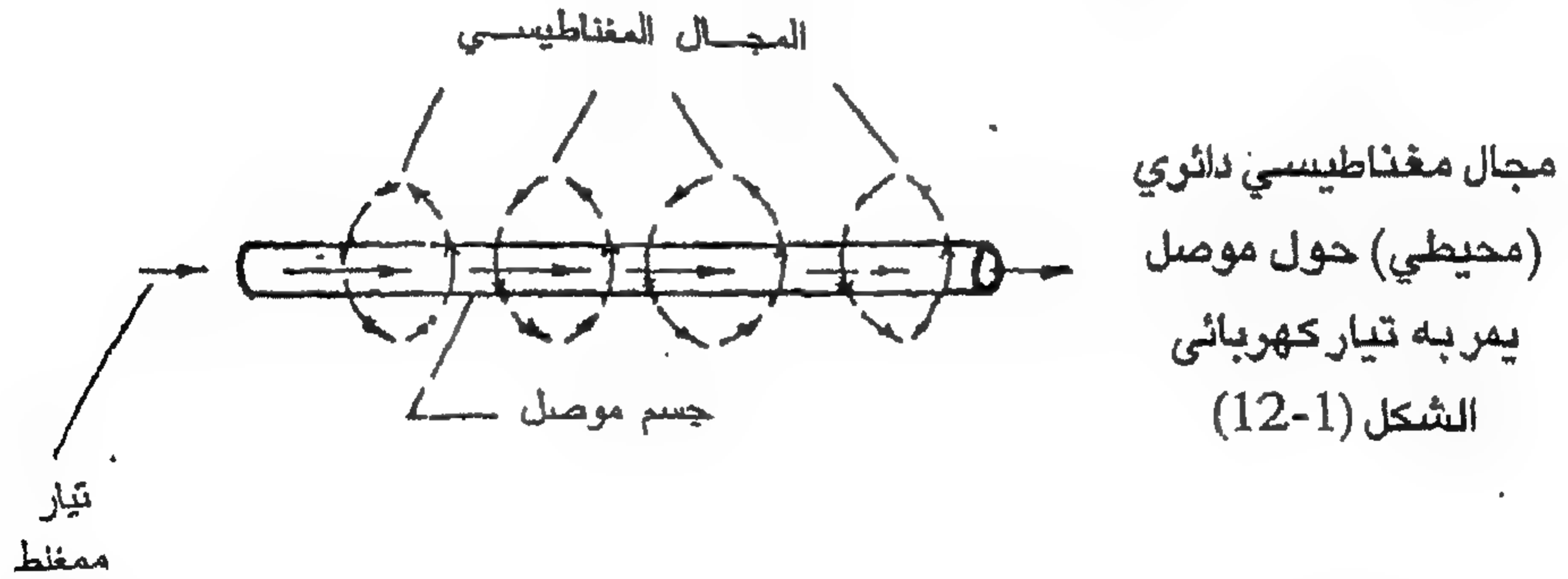
ومن الجدير بالذكر أن مقدار تكبير حجم العيب يكون بحدود 200 ضعف في هذه الطريقة، ولذا يمكن رؤية حتى العيوب الدقيقة جداً.

التمغنت بالتيار الكهربائي:

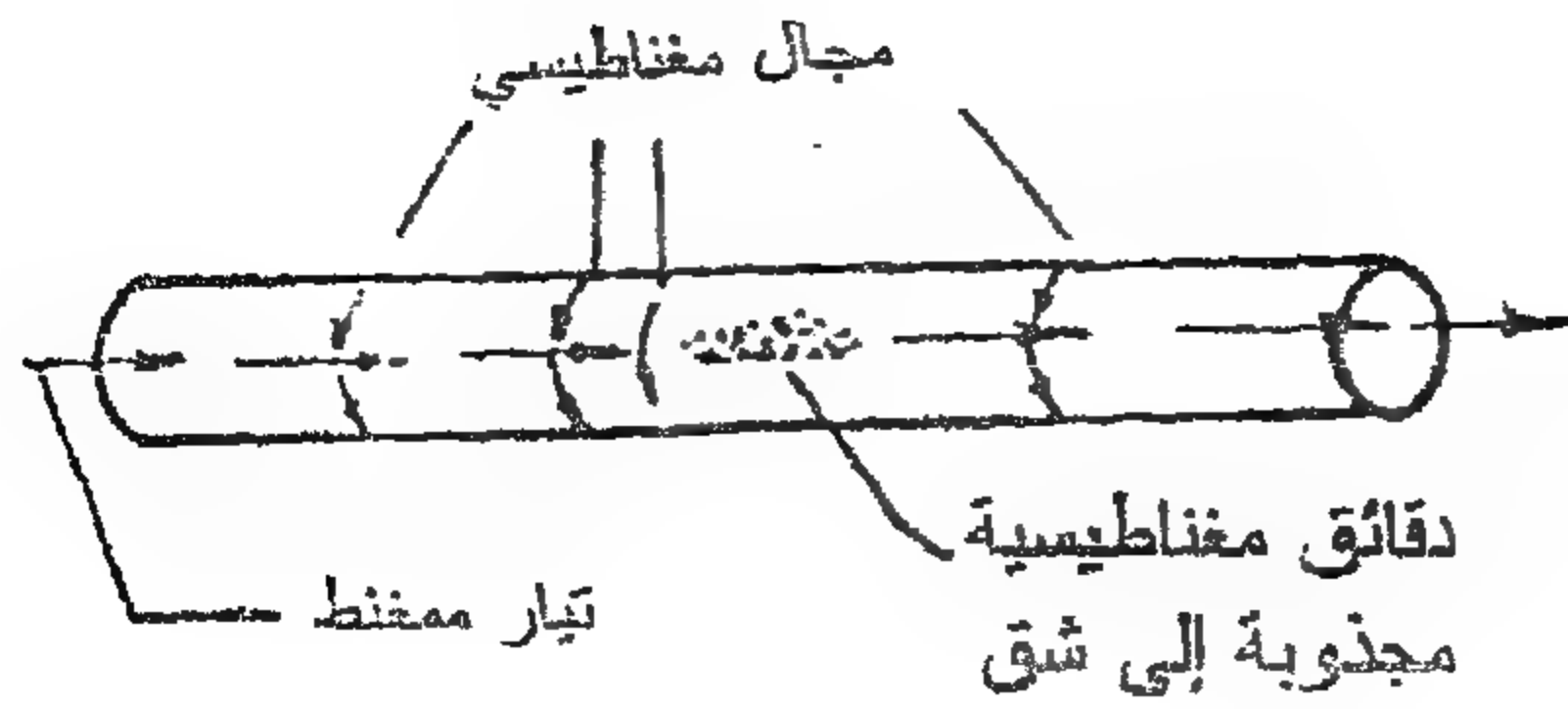
يستخدم التيار الكهربائي عادةً لتوليد مجال مغناطيسي في المواد المغناطيسية. وبما أنه يمكن تغيير اتجاه المجال المغناطيسي بتغيير اتجاه مرور التيار الممغنت، لذا يمكن الحصول على خطوط قوى مغناطيسية عمودية على اتجاه الشق أو العيب الموجود في الجزء المفحوص وذلك بتغيير اتجاه مرور التيار.

أ- التمغنت الدائري:

يتولد مجال مغناطيسي دائري حول الجسم الموصل المستقيم كالسلك عند مرور تيار كهربائي فيه كما في الشكل 1-12. تكون خطوط القوى المغناطيسية (أو مستوياتها) دائماً عمودية على اتجاه التيار الذي يولد المجال المغناطيسي. وتتبع علاقة اتجاه خطوط القوى المغناطيسية باتجاه التيار قاعدة اليد اليمنى حيث يمثل الإبهام اتجاه التيار وبقيّة الأصابع اتجاه الخطوط المغناطيسية حول السلك. ويولد التيار المار بالجسم الموصل القابل للتمغنت مجالاً مغناطيسياً في الجسم نفسه وحوله أيضاً وإلى مسافة معينة منه تعتمد على شدة التيار المار و مادة الجسم. وهذا النوع من التمغنت يسمى بالتمغنت الدائري.



يولد هذا النوع من التمغنت أقطاباً مغناطيسية على طرفي الشق الموازي لطول الجسم المار به التيار، كما هو موضح في شكل 1-13.



مجال مغناطيسي دائري
بإمرار تيار كهربائي
بالجسم المفحوص الشكل
(13-1).

أما بالنسبة إلى الأجسام المجوفة كالإسطوانات والأنابيب فمن الممكن أمرار تيار كهربائي مناسب بسلك موصل يمر في المحور وعندها يمكن فحص السطح الداخلي والخارجي نتيجة للمجال المغناطيسي الدائري المتولد في كل منهما.

يمكن كذلك توليد مجال دائري موضعي (وغالباً ما تستخدم هذه الطريقة) لفحص الأجزاء المسطحة والكبيرة حيث يستخدم تيار عالي نسبياً (حسب حجم الجزء المفحوص) باستخدام أسلاك معزولة وأقطاب خاصة لإمرار التيار خلال منطقة الفحص، الشكل 14-1 .

ب- التمغنط الطولي:

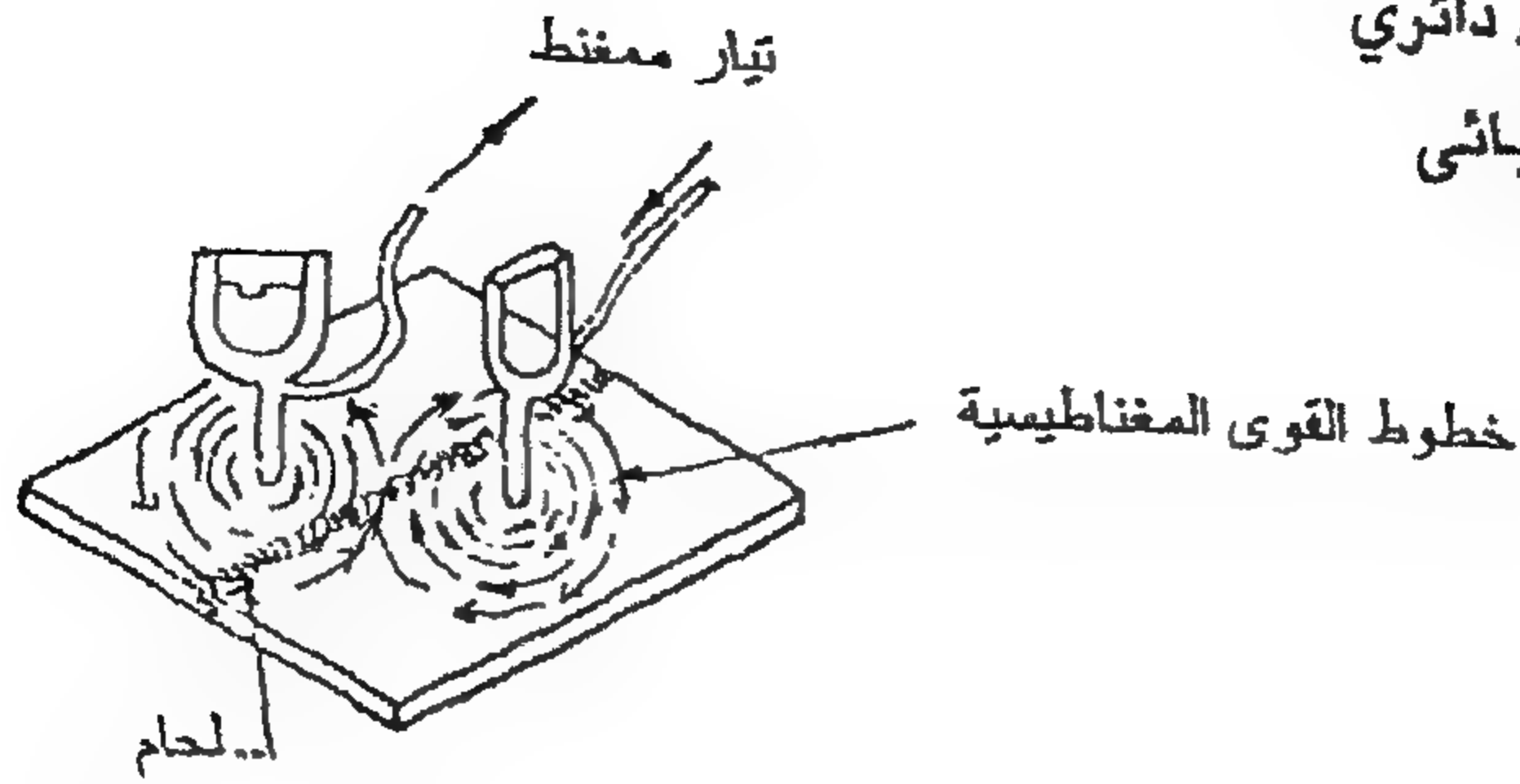
يمكن استخدام التيار الكهربائي أيضاً لتوليد المجال المغناطيسي الطولي في المواد المغناطيسية فعند مرور تيار كهربائي في ملف ذي لفات عديدة فينشأ مجال مغناطيسي طولي (موازٍ لمحور الملف) هو محصلة المجال المغناطيسي حول كل لفة من اللفات كما في الشكل 15-1 . فإذا تم وضع مادة مغناطيسية داخل الملف فستتركز خطوط القوى المغناطيسية فيها مكونة مجالاً مغناطيسياً طولياً، وإذا تواجد شق أو صدع عرضي في المادة المغناطيسية (الجزء المراد فحصه) فسيكون هناك قطبان مغناطيسيان على طرفي الشق وهذا سيجذب الدقائق المغناطيسية المتناثرة مدلاً على وجود الشق، الشكل 16-1.

من المعلوم أن شكل وحجم الجزء المراد فحصه هو الذي يحدد الطريقة التي يجب استخدامها في الفحص (تمغنط طولي أو عرضي). فإذا تم وضع دولاب (Wheel)

تكوين مجال مغناطيسي دائري

موضعي بامرار تيار كهربائي

الشكل (14-1)

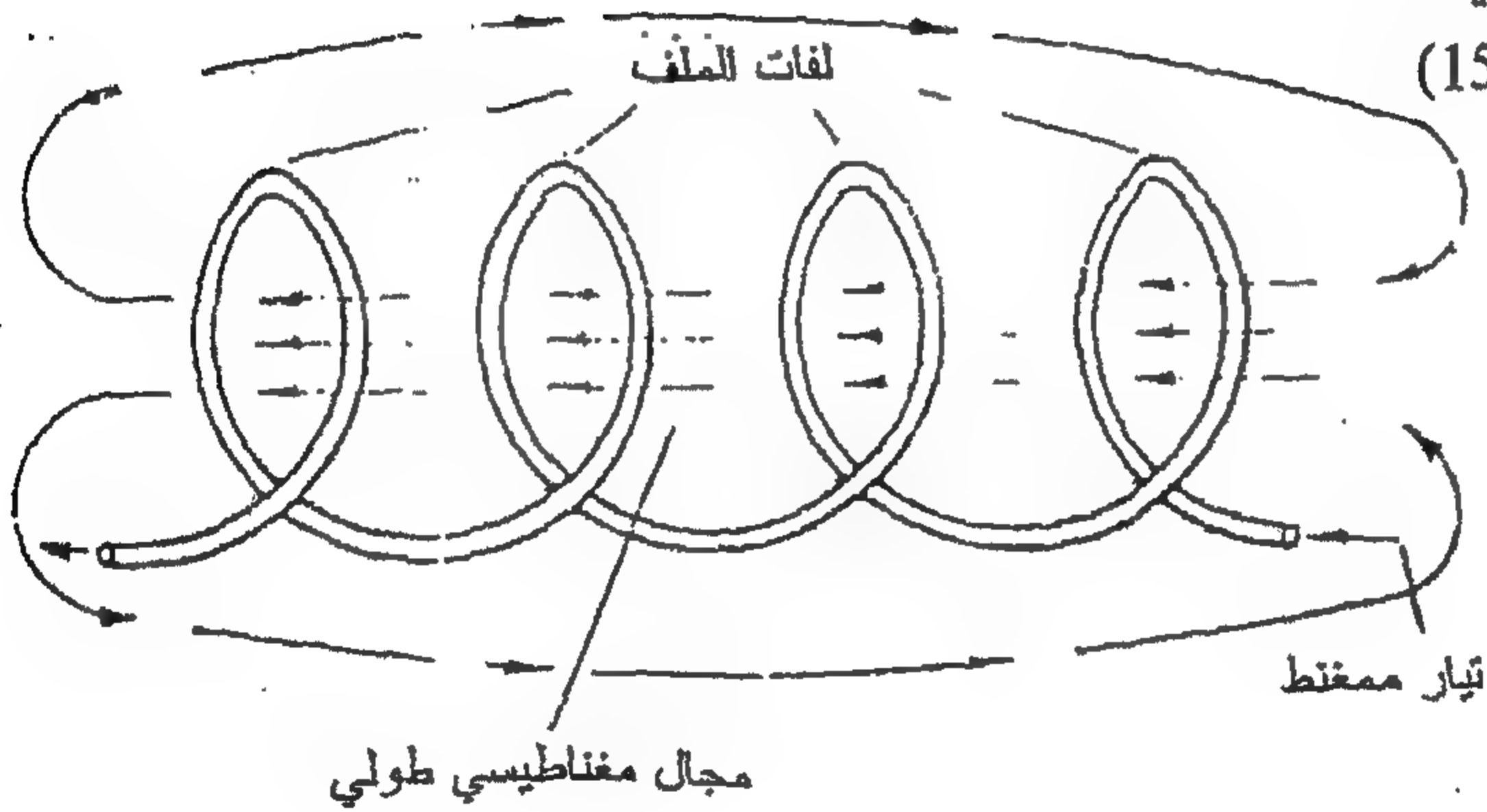


مجال مغناطيسي طولي متولد

في ملف نتيجة لمرور تيار

كهربائي فيه

الشكل (15-1)



تيار ممغنط

مجال مغناطيسي طولي

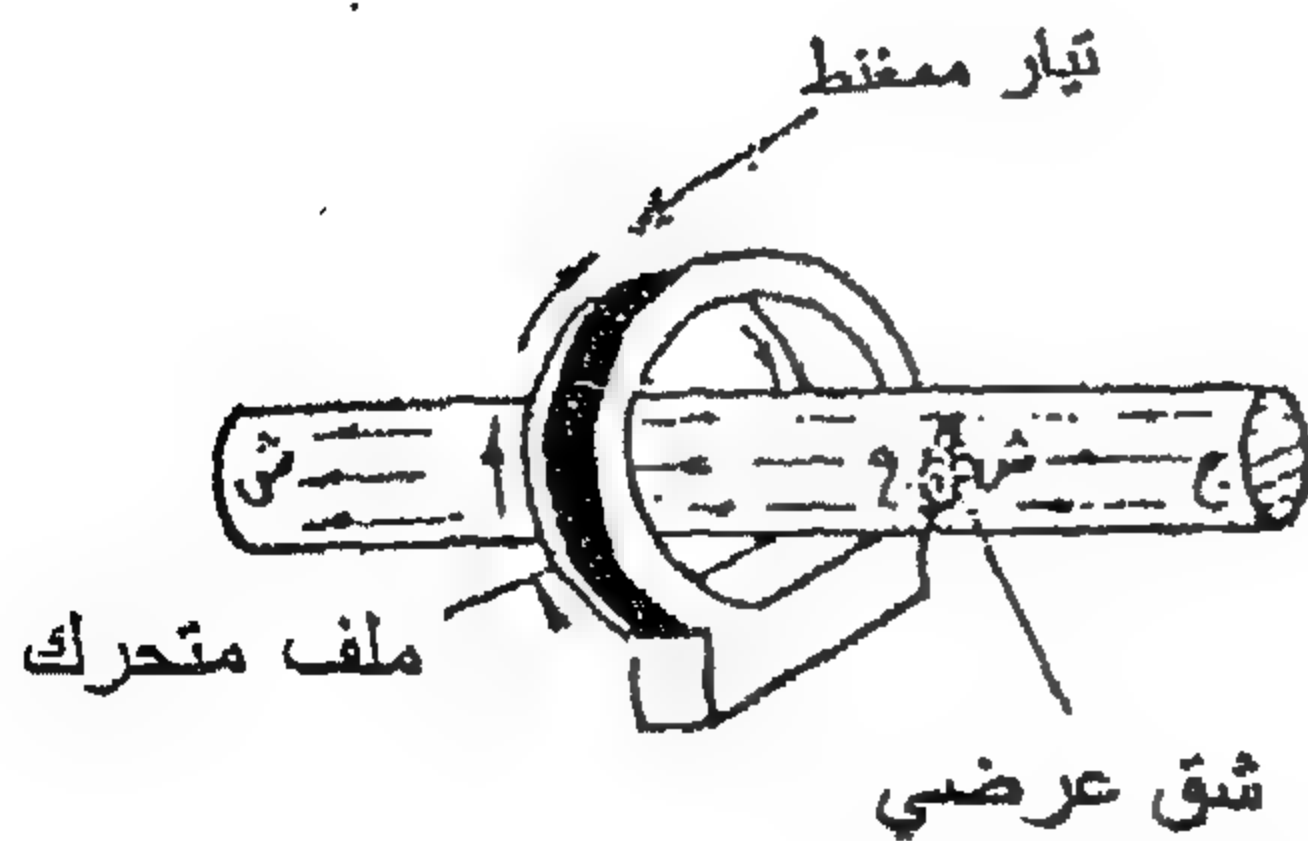
جسم موضوع في فتحة ملف

يمر به تيار مناسب ويشاهد

تراكم الدقائق على شق عمودي

على اتجاه المجال.

الشكل (16-1)



في مركز ملف فإن العيوب القطرية في المنطقة المظلمة ستظهر بوضوح في حين ستكون غير واضحة أو مخفية تماماً في المناطق الأخرى نظراً لكونها موازية تقريباً للمجال المغناطيسي ولهذا يجب تدوير الدولاب بزاوية مقدارها 90° ليتمكن إظهار عيوب المناطق الأخرى ، كما في الشكل 1-17.

يمكن أيضاً توليد مجالاً طويلاً باستخدام جهاز المقرن (اليوك Yoke) في جزء أو كل القطعة المفحوصه (وهذا الجهاز هو الأكثر شيوعاً في المختبرات). يتكون المقرن من مادة مغناطيسية لينه (Soft Magnetic Material) على شكل حرف U ، وهي إما أن تكون صلبة أو صفائحية ، ملفوف حول الجزء الوسطي منه ملف يمر فيه تيار مناسب. تمر خطوط القوى المغناطيسية خلال الجسم ، المراد فحصه ، عند وضعه بين طرفي الفتحة (الذراعين) أثناء مرور التيار في الملف وبهذا يمكن لخطوط المجال أن تكمل دوره والشكل (1-18) يوضح ذلك.

تيارات الممغنطة:

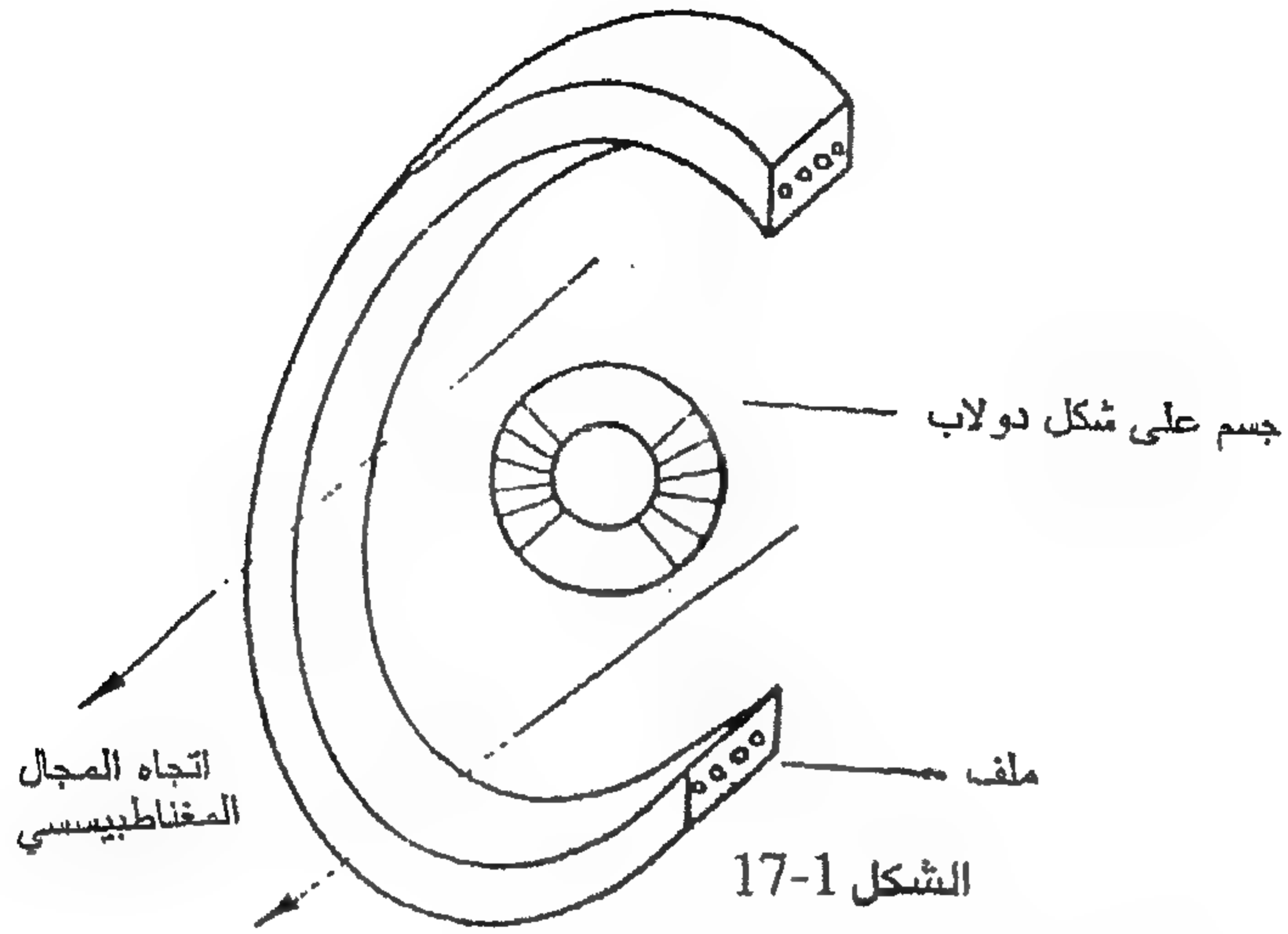
يمكن استخدام التيار المباشر (Direct Current) سواء المأخوذ من البطاريات أو الأجهزة المعدلة للتيار المتناوب (Rectifiers). ومن خواص التيار المباشر أنه يمر بعمق أكبر في الجزء المفحوص.

أما النوع الآخر فهو التيار المعدل (المقوّم) نصف موجياً (half-wave rectified current) وهو التيار الأكثر تأثيراً عند التفتيش عن الشقوق أو العيوب السطحية (Surface defects) وتحت السطحية (Subsurface defects) والنبضات الموجودة في هذا النوع من التيار تساعد على زيادة قابلية حركة الدقائق المغناطيسية والتجمع على العيوب ومن ثم إظهارها بصورة واضحة.

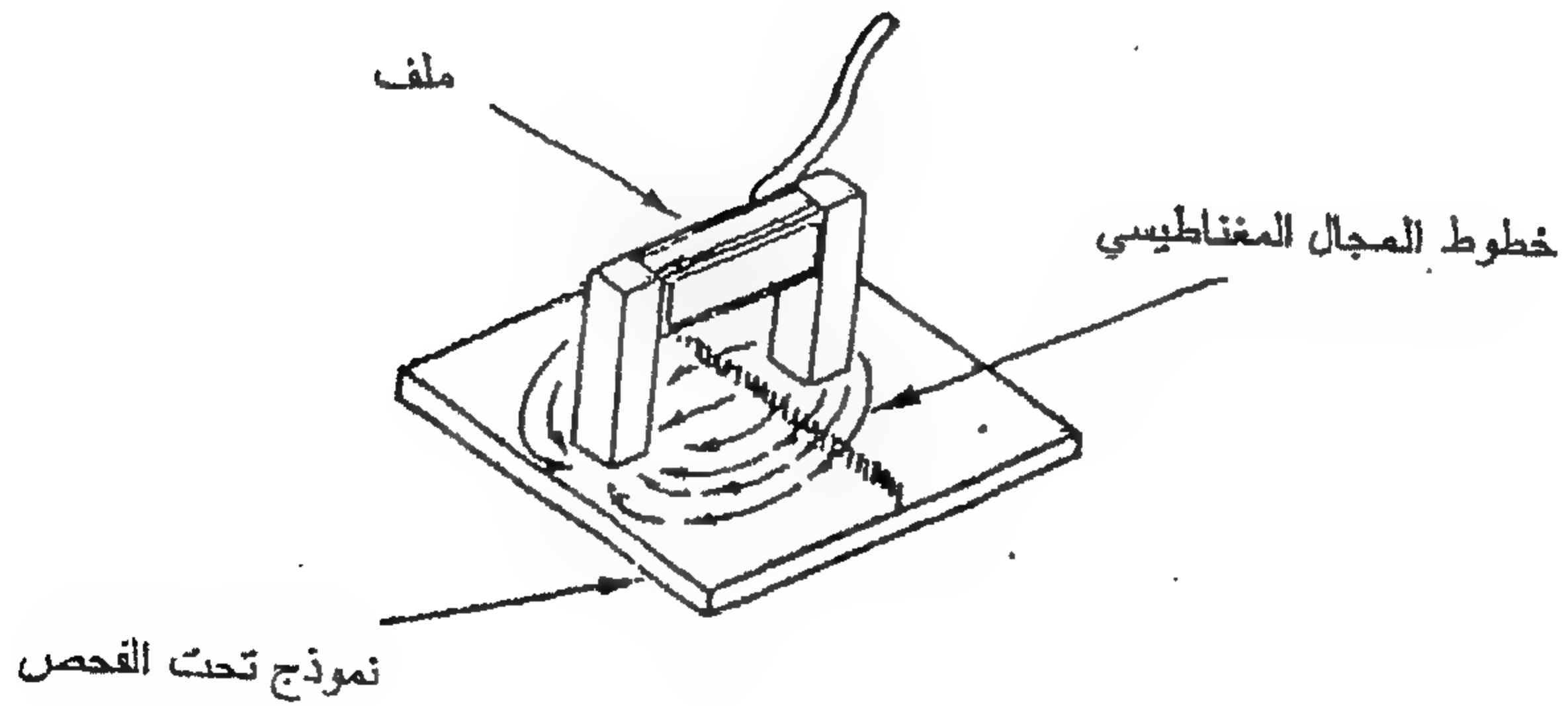
والنوع الثالث هو التيار المتناوب (Alternating Current) "A C" أي الذي له تردد معين وهو التيار الأكثر فعالية لفحص الشقوق السطحية وخصوصاً الشقوق الناتجة عن الكلال (fatigue). يستفاد من استخدام هذا النوع من التيار في إزالة آثار التمغنط المتخلقة بعد الفحص أيضاً.

اتجاه المجال المغناطيسي:

يؤثر اتجاه المجال المغناطيسي بالنسبة للشق أو العيب على فاعلية هذه الطريقة



دول ب موضوع في فتحة ملف يمر به التيار.
العيوب القطرية (باتجاه القطر) تظهر فقط في المنطقة المظلمة وقد لا تظهر في المناطق الأخرى



الشكل 18-1
تمغنط طولي بواسطة اليوك (المقرن)

في الفحص أكثر من نوعية التيار المستخدم. ويجب ان تكون خطوط القوى المغناطيسية عمودية على الشق المراد إظهاره بشكل واضح. يتكون تسرب مغناطيسي قليل جداً عند الشق إذا كانت خطوط القوى موازية للشق وعليه سيكون انجذاب الدقائق اليه قليل أيضاً، إن لم يكن معدوماً ،ولهذا لا يمكن إظهار العيوب بصورة جلية.

طريقة العمل:

يكون المجال المغناطيسي على أشده عندما يكون التيار في حالة مرور. أما بعد انقطاع التيار فإن المجال المغناطيسي سينخفض الى أدنى مستواه ويسمى المجال المغناطيسي المتخلف. يكون المجال المغناطيسي المتخلف ضعيف جداً في الفولاذ المطيل (mild Steel) ولذا يكون انجذاب الدقائق المغناطيسية ضعيفاً أيضاً ومن ثم يكون الاستدلال على وجود العيب كذلك. أما في حالة الفولاذ الصلب (المحتوى على نسبة عالية من الكربون) فيكون المجال المتخلف عالياً نسبياً إلا أنه يظل أقل مما لو كان التيار في حالة مرور. لذلك يمكن القول بأن الفحص أثناء مرور التيار الكهربائي الممغنط أدق وأضمن وعندها تسمى هذه الطريقة بطريقة المجال المستمر كما يسمى الفحص بعد انقطاع التيار بطريقة المجال المتخلف. يصعب استخدام الطريقة الأخيرة في فحص العيوب التي تحت السطح، لذلك يمكن استغلال هذه الخاصية للتفريق بين العيوب السطحية وتحت السطحية، وذلك بتعريض الجسم المراد فحصه للدقائق المغناطيسية مرتين، مرة أثناء مرور التيار الممغنط مع تسليط تيار هوائي خفيف لإزالة الفائض من الدقائق ومن ثم تحديد أماكن تجمعها التي تدل على وجود العيوب. وتعاد العملية مره ثانية بعد قطع التيار الكهربائي الممغنط (طريقة المجال المتخلف) وعندها سيكون التجمع على العيوب السطحية فقط.

تسمى طريقة تعريض الجسم للدقائق بتذريتها في الهواء بالطريقة الجافة نظراً لكون كلا من الدقائق والجسم المراد فحصه جافين تماماً.

يغمر الجزء المراد فحصه في سائل رائق (كالماء او الزيت او ماشابه ذلك) يحتوي على دقائق مغناطيسية عالقة فيه (لتكون قابليتها على الحركة كبيرة) وتدعى

بالطريقة الرطبة، ويمكن تسليط السائل على الجزء المراد فحصه بواسطة صنوبر (حنفية) أو أية وسيلة أخرى. تنجذب الدقائق العالقة نحو العيوب السطحية عند مرور التيار الكهربائي. ويستحسن، في حالة غمر الجزء في السائل ، عدم وجود تيارات حركية لكي لا تعمل على ازالة تجمعات الدقائق المجذوبة جذباً خفيفاً بسبب ضعف المجال المغناطيسي المتسرب.

ملاحظات حول هذه التقنية:

أ- لا تكون الدقائق المستخدمة في العادة ، مجرد برادة حديد بل هي دقائق منتقاة خصيصاً من بعض اكاسيد الحديد ولها حجم وشكل وقابلية معينة على التمغنط والاحتفاظ بالمغنة لتلائم مثل هذه الفحوص . تلون هذه الدقائق غالباً، ليسهل تمييزها على اختلاف الوان الاجزاء المفحوصة.

ب- يتم تجهيز الدقائق في الطريقة الرطبة بشكل معجون مغناطيسي (وهو متوفر بأكثر من لون). يتم حل المعجون في سائل خفيف وشفاف وبذلك يكون المحلول جاهزاً للفحص الى ان يتلوث بصورة تعيق عملية الفحص فعند ذلك يجب استبداله.

ج- يتم طلاء بعض انواع الدقائق بمادة متألقة (fluorescent) وخصوصاً تحت الأشعة فوق البنفسجية ، لزيادة مدى إظهارها ومن ثم رؤيتها بوضوح سيما التجمعات القليلة على الشقوق الدقيقة. ويجب ازالة اي مادة متألقة أخرى عن الجسم المراد فحصه قبل بدء الفحص لما تسببه من تشويش وخلط بين تراكمات الدقائق والمادة المتألقة الموجودة مسبقاً، كما يستحسن، زيادة في الدقة، إجراء هذا الفحص في مكانٍ مظلم تقريباً لمنع تأثير الضوء المرئي مهما أمكن . يكون مصباح بخار الزئبق هو مصدر الأشعة القريبة من فوق البنفسجية (وتسمى أحياناً بالضوء الأسود وهي ذات طول موجي مقداره 365 نانوميتر وهي غير خطره على العين او الجلد). يزود مصباح بخار الزئبق بمرشح خاص للحصول على هذا الطول الموجي.

د- يستحسن ، وقد يكون ضرورياً في بعض الأحيان ، إزالة التمكنط المتخلف في الجزء بعد الفحص للأسباب التالية :

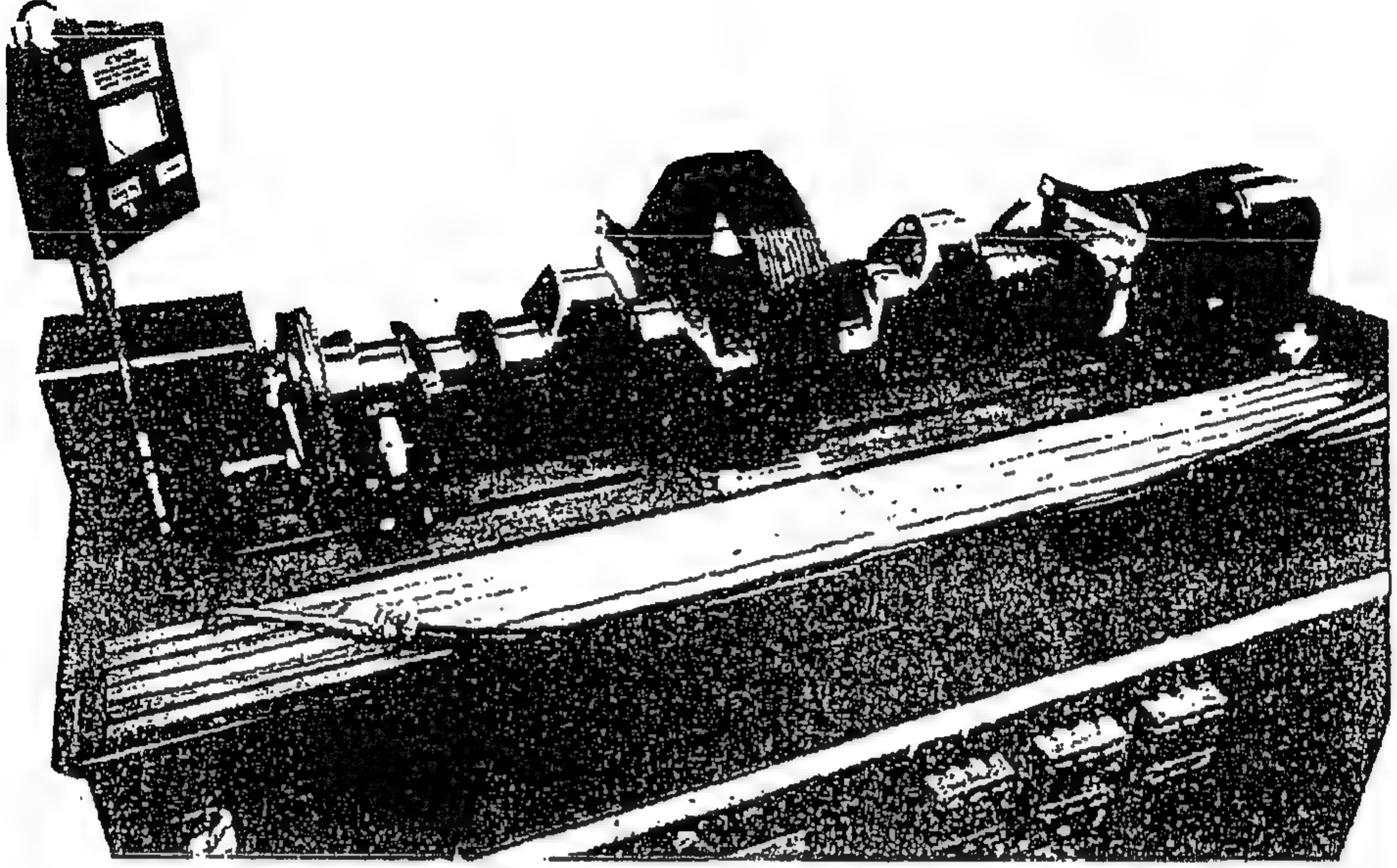
١- تقليل الاحتكاك الناتج عن المغناطيسية المتخلفة في الأجزاء المتحركة وخصوصاً إذا كان التمكنط المتخلف قوياً كما هو الحال بين المكبس وجدار اسطوانته (Pis-ton and cylinder).

٢- التأثيرات السلبية الناتجة عنه على أجهزة القيادة والسيطرة وخصوصاً في الطائرات حيث يؤثر هذا المجال ، على سبيل المثال ، على البوصلات وأجهزة قياس التيار والفولتية وغيرها.

٣- التأثير على نظافة الجزء حيث تجمع المغناطيسية المتخلفة دقائق و رقائق المواد المغناطيسية لتلتصق على سطح الجزء المفحوص ، إضافة الى تأثير هذه الظاهرة على نوعية اللحام عند لحام الجزء حيث تلتحم المواد العالقة عند منطقة اللحام لتشوه السطح ، إضافة الى احتمال انحراف القوس الكهربائي اثناء اللحام اذا كان التمكنط المتخلف شديداً.

تتم ازالة التمكنط المتخلف بوضع الجسم في مجال مغناطيسي متغير الإتجاه (في ملف او بين فتحة مقرن يمر فيه تيار متناوب) مع تغيير قيمته تدريجياً ومن ثم سحب الجسم بهدوء. أما الطريقة الأخرى فهي رفع درجة حرارة الجسم الى الدرجة التي تزال عندها الخواص المغناطيسية (درجة حرارة كوري) والتي هي بحدود 650-870 درجة مئوية وحسب طبيعة ومادة الجسم ، لكنه لا يخفى مال هذه الطريقة من جوانب سلبية على المعاملات الحرارية السابقة للجسم إضافة الى الأكسدة الناتجة عن ذلك ، وهناك طريقة ثالثة لإزالة المغناطيسية المتخلفة وهي الطرق الميكانيكي للجزء لكن لهذه الطريقة جوانب سلبية هي احتمالية تشقق او تشوه الجزء ، وبهذا تكون الطريقة الأولى هي الأنسب.

هناك تطبيقات عديدة لهذه التقنية في الصناعة ويشاهد في الشكل (1-19) احدى هذه التطبيقات وهي فحص العمود المرفقي (Crankshaft) لسياره.



الشكل 19-1

منصة لفحص الأعمدة المرفقية بالدقائق المغناطيسية

٤-٤-١ الفحص بالطريقة الشعاعية:

المقدمة:

ان الغاية من الفحص بالطريقة الشعاعية هو الحصول على صور دقيقة وواضحة للعيوب الموجودة في الجسم (الجزء المراد فحصه). تتكون هذه الصور نتيجة لتغير شدة الأشعة بسبب مرورها خلال الجسم. ويعزى هذا الاختلاف لمدى شفافية الأجسام للأشعة السينية أو أشعة كاما أو النيوترونات. يتم تسجيل هذه الاختلافات عادة على فلم تصوير (Photographic film) بدلالة الاختلافات في درجة الإسوداد الناتج في الفلم. يمكن اختبار حساسية الطريقة باستخدام ما يسمى بكاشف نوعية الصورة (Image Quality Indicator "IQI") حيث يتم وضعه على الجسم من جهة سقوط الأشعة بحيث يكون تصويره مع الجسم في آن واحد.

يؤخذ مقدار وضوح كاشف نوعية الصورة المرئي على الفلم المحض كدليل لنوعية أو حساسية هذه التقنية بشكل عام ومن ثم لنوعية العيوب الموجودة في الصورة. يمكن تقسيم هذا الأسلوب من الفحص الى أكثر من تقنية وأهمها:

١- الفحص بالأشعة الكهرومغناطيسية قصيرة الطول الموجي ، وتنقسم بدورها الى تقنيتين:

أ- الفحص بالأشعة السينية X-Ray Radiography

ب- الفحص بأشعة كاما Ray Radiography - γ

٢- الفحص شعاعياً بالنيوترونات Neutron Radiography

الفحص بالأشعة السينية وأشعة كاما:

قبل الدخول في تفاصيل وأسس الفحص بهذه الطريقة من المفضل اعطاء فكره عن طبيعة هذه الاشعاعات.

ان طبيعة كلتا الاشعتين واحده وهما جزء من طيف الأشعة الكهرومغناطيسية.

يشتمل هذا الطيف إضافة الى أشعة كاما والأشعة السينية على الأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء وغير ذلك من الأشعة كأشعة الرادار والراديو الى آخره، كما في شكل (1-20) .

يختلف كل من أشعة كاما والأشعة السينية عن بقية أمواج الطيف في ان لهما أطوال موجيه قصيرة.

يقع الطول الموجي للأشعة السينية وأشعة كاما المستخدمين في الفحص الشعاعي بين (1) انكستروم (Å) الى أجزاء من الألف من الإنكستروم ($1\text{Å} = 10^{-8}$ cm). يحدد الطول الموجي قدرة الاشعة على اختراق المادة حيث أن

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \dots\dots\dots (1-1)$$

E : طاقة الفوتون .

ν : التردد بالهيرتز (Hz)

h : ثابت بلانك

C : سرعة الضوء (3×10^{10} cm/sec)

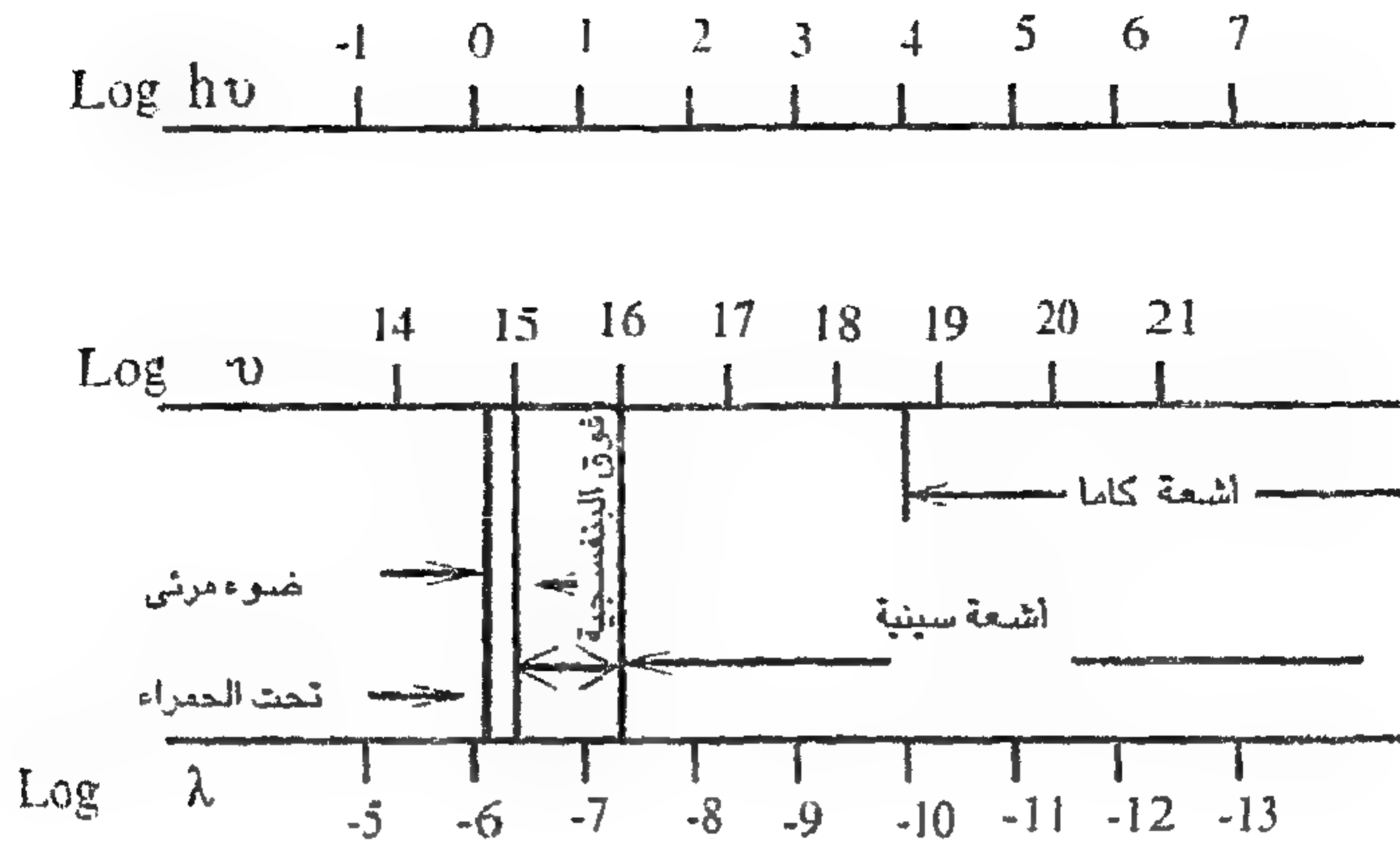
λ - الطول الموجي

يتبين من هذه المعادلة أنه كلما كان الطول الموجي للأشعة أقصر كلما كانت طاقة الفوتون أكبر ومن ثم قدرة اختراق أعلى.

يكن الفرق الأساس بين الأشعة السينية وأشعة كاما. كما سيتبين فيما بعد، في اختلاف مصدرهما وفي توزيع الطول الموجي في طيف كل منهما.

الأشعة السينية:

تتولد الأشعة السينية من التباطء، المفاجيء للإلكترونات المعجلة بوساطة فرق جهد كهربائي عالي، عند اصطدامها بلوح معدني ملائم . تتم السيطرة على الطاقة الحركية للإلكترونات المعجلة ومن ثم الطول الموجي للأشعة بوساطة فرق الجهد (الفولتية) بين المصعد (anode) والمهبط (cathode). لذا يمكن تغيير الطول الموجي عند الحاجة بتغيير الفولتية المعجلة.



$$h\nu = \text{طاقة الفوتون (ev)} , \nu = \text{التردد (Hz)} , \lambda = \text{الطول الموجي (m)}$$

الشكل 20-1

جزء من طيف الأشعة الكهرومغناطيسية مع طاقة فوتوناتها (ev)

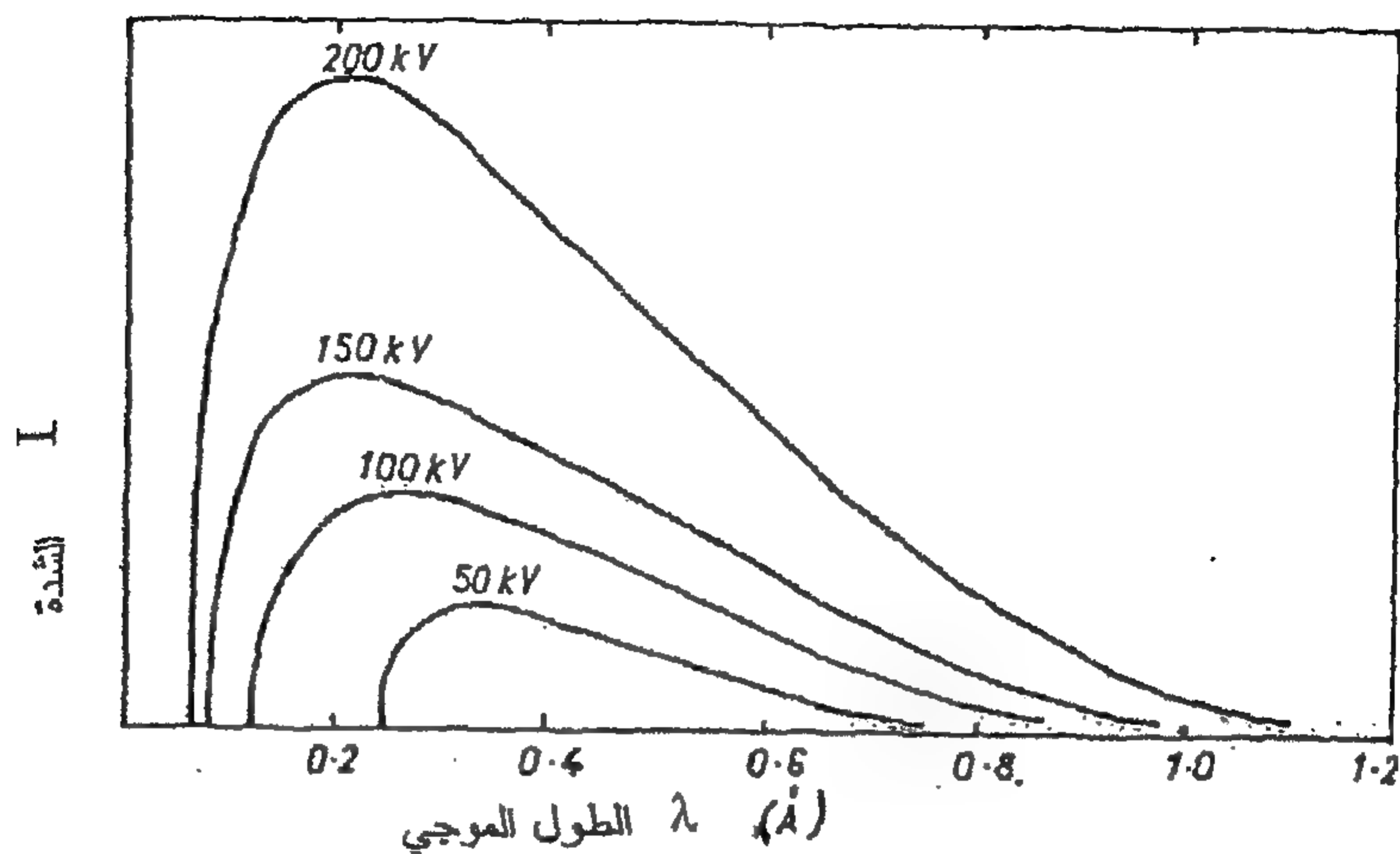
يمكن التعبير عن اقصر طول موجي (λ_{\min}) موجود في حزمة الأشعة السينية عند فولتيه معجلة مقدارها (V) بالفولت بالآتي:

$$\lambda_{\min} = h \frac{12400}{V} \dots\dots\dots(2-1)$$

يتألف طيف الأشعة السينية الناتج من أشعاعات ذات اطوال موجية مختلفة . ينزاح الطول الموجي عند أعظم شدة نحو الجهة الأقصر للطول الموجي كلما زادت الفولتيه المعجلة المستخدمة . كما في شكل (21-1) . ولهذا تزداد قدرة الأشعة السينية على اختراق الأجسام كلما زادت الفولتيه المعجلة كما في الشكل (22-1) .

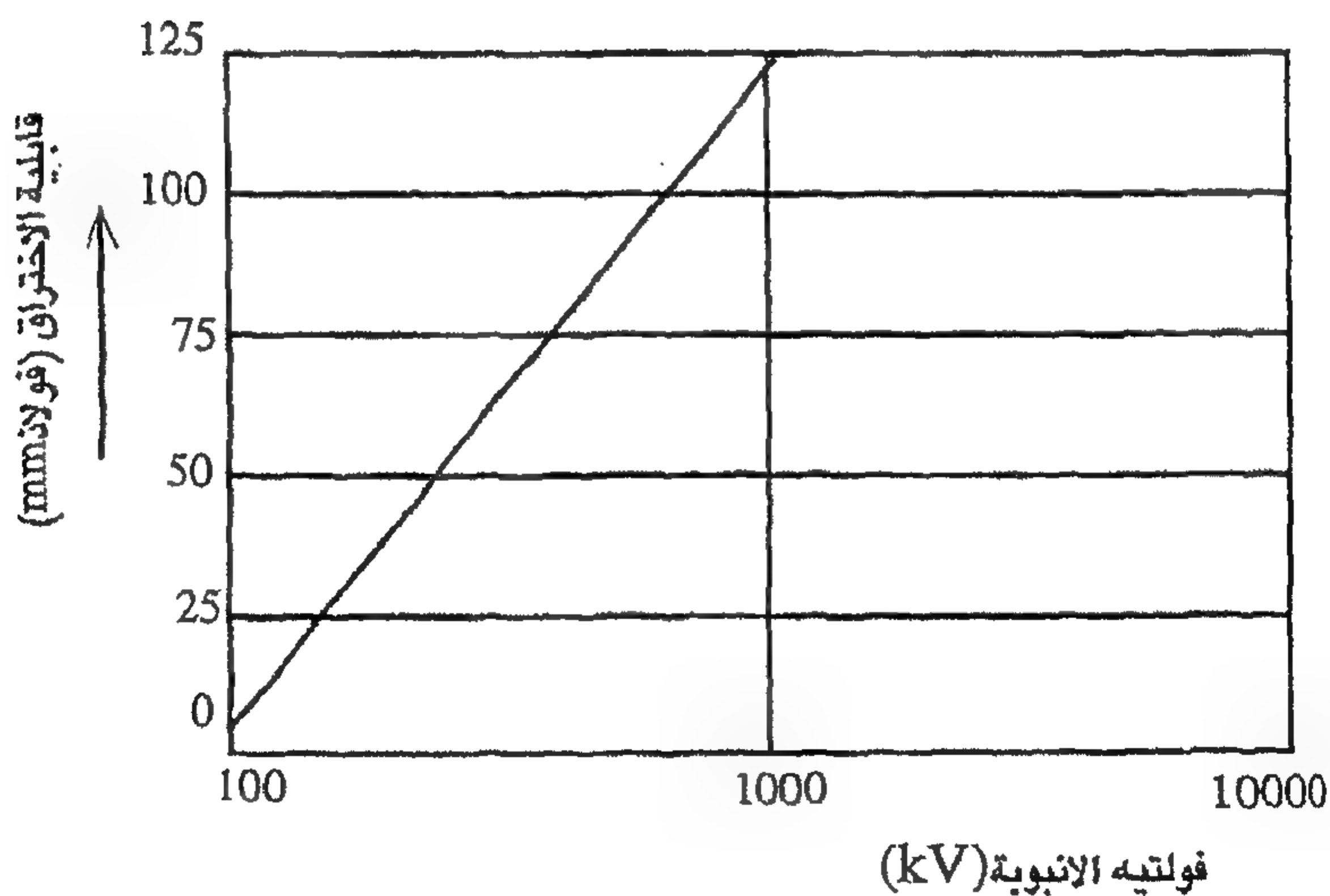
تكون أعظم شدة عند طول موجي أطول بقليل من الطول الموجي الأقصر (λ_{\min}) . ان المنحنيات الموجودة في شكل (21-1) صحيحة على وجه التقريب حيث لم تؤخذ في الاعتبار الاشعاعات المنفصلة عن بعضها والمميزة (characteristic radiation)

لكل عنصر تتألف منه سبيكة الهدف (target) . وسيتم التطرق الى تفاصيل ذلك عند
دراستنا لحيود الأشعة السينية .



الشكل 21-1

توزيع الأطوال الموجية مع الشدات النسبية كدالة للفولتية المعجلة



شكل 22-1

تأثير الفولتية المعجلة على قابلية اختراق الأشعة السينية.

أما أشعة كاما فتتألف من إشعاعات تنبعث تلقائياً من قبل مواد معينة والتي يمكن ان تكون مواد طبيعية (على سبيل المثال الراديوم والرادون والثوريوم) او صناعية (مواد نشطة شعاعياً).

تمتلك أشعة كاما المنبعثة من النظائر المشعة (radioactive isotopes) واحد أو أكثر من الأطوال الموجية والتي تكون مميزة لكل نظير مشع ، أي أن لكل نظير مشع طيفه المميز.

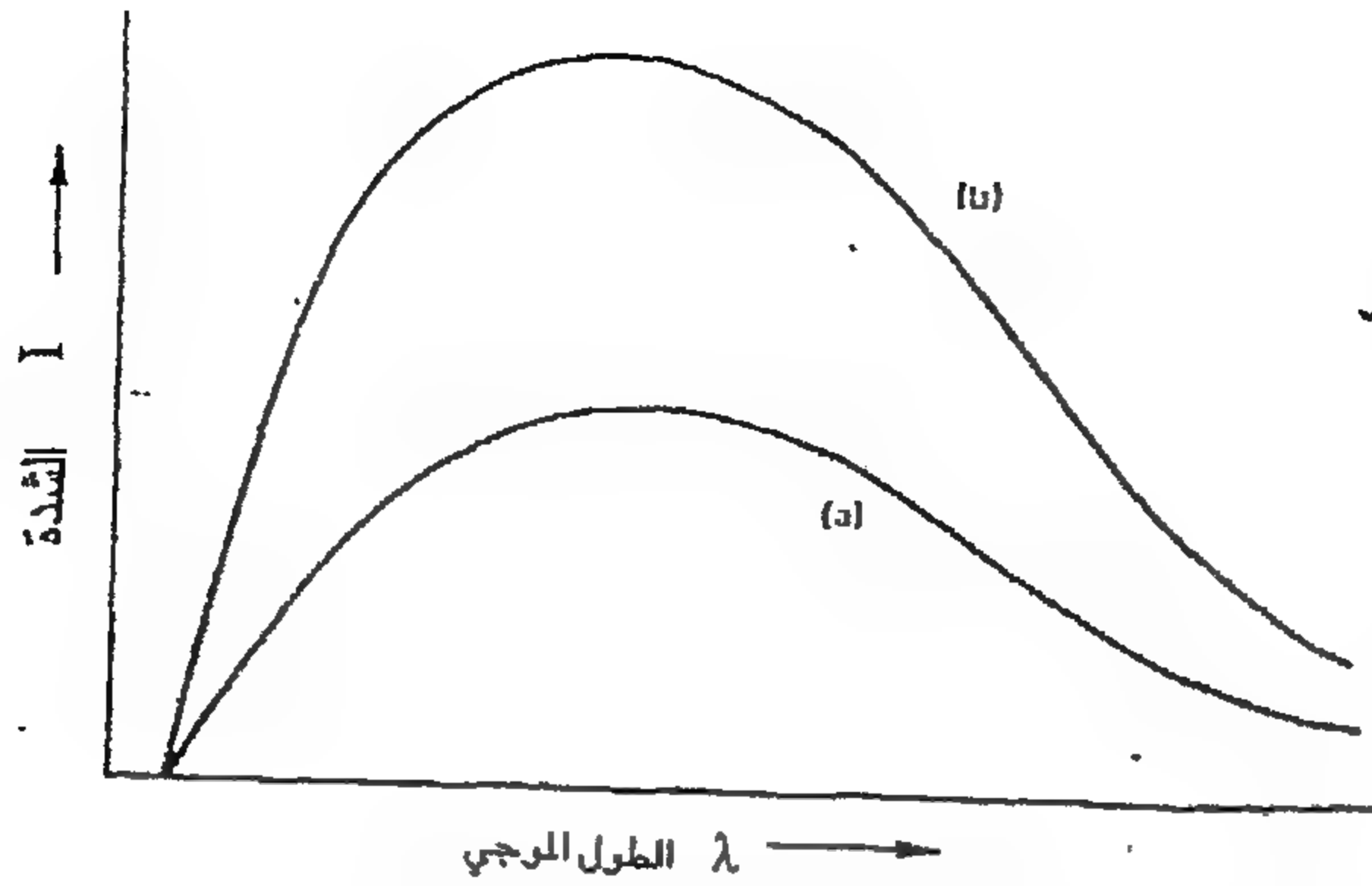
إذا تأملنا حزمة من الأشعة منبعثة أما من مصدر للأشعة السينية او أشعة كاما ، فسنرى أنها تتصف بأطول موجية هي التي تتألف منها الحزمة وبشدة معينة أي بكمية معينة من الطاقة تمر بالثانية الواحدة خلال سنتيمتر مربع واحد على سطح عمودي على الحزمة نفسها.

تقاس شدة الأشعة السينية او كاما من الناحية العملية بالروننتكن (roentgen) R* بالثانية . يمكن تغيير شدة الأشعة السينية، والى مدى معين، بتغيير التيار المار بأنبوبة الأشعة السينية عند فولتيه تعجيل محده كما في شكل 1-23 .

أما في حالة أشعة كاما، فتكون الشدة المنبعثة من المصدر احدى خواص المصدر نفسه وعليه لا يمكن التلاعب بها.

تعتمد شدة الأشعة الواصلة الى فلم التصوير على المسافة بين المصدر والفلم (Sfd) حتى لو لم يكن هناك نموذج للفحص وحسب قانون التربيع العكسي، اي انه إذا تضاعفت المسافة مرتين فالشدة ستتنخفض الى الربع وعليه تكثر زيادة زمن التعريض اربع مرات، على سبيل المثال:

* الرونتكن: هو مقدار الاشعة السينية او أشعة كاما التي إذا مرت خلال سنتيمتر مكعب من الهواء الجاف عند درجة الصفر المئوي وضغط جوي واحد تحرر بالتأين مقداراً من الكهربائية يساوي وحده واحدة من الكهربائية المستقرة.



شكل 1-23

تأثير تيار الأنبوبة على تغير
شدة الأشعة السينية مع
الطول الموجي
a- تيار انبوبة منخفض
b- تيار انبوبة عالي

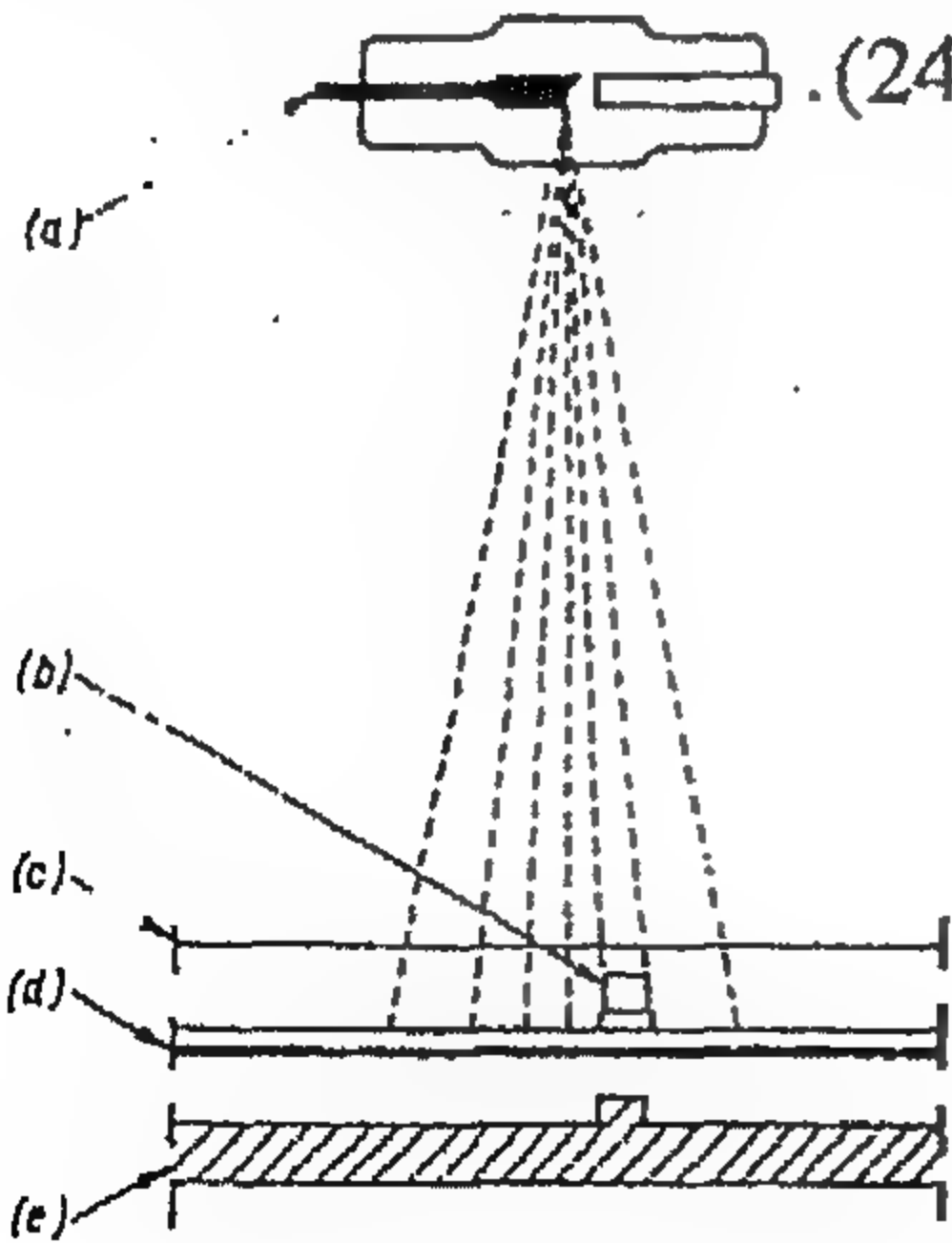
تمتلك أشعة كاما والأشعة السينية القابلية على اختراق الأجسام حتى المعتمة بالنسبة للضوء المرئي . ويجب ملاحظة ان شدة الشعاع النافذ من الجسم هي اقل من شدة الشعاع الساقط عليه. يعتمد مقدار التوهين في شدة الشعاع النافذ على طبيعة وسمك النموذج وحسب العلاقة التالية:

$$I = I_0 e^{-\mu t} \dots\dots\dots (3-1)$$

حيث تمثل I_0 شدة الشعاع الساقط، و I شدة الشعاع النافذ بعد مروره خلال النموذج، و μ معامل الإمتصاص والذي يعتمد بدوره على العدد الذري وكثافة مادة النموذج وعلى طاقة الاشعة (طولها الموجي) ، و t السمك المار خلاله الشعاع و e هي أساس اللوغاريتم الطبيعي (2.718).

تحتل المعادلة (3-1) أهمية عملية خاصة ، حيث تعتبر الأساس لكل طرائق

الفحص الشعاعية ويمكن ملاحظة ذلك من الشكل (1-24).



شكل 1-24 رسم تخطيطي

لتكوين الصورة الشعاعية

a- انبوبة الأشعة السينية

b- فجوة c- لوح فولاذي

d- فلم تصوير

e- توزيع شدة الإسوداد على فلم التصوير

فعندما توجه حزمة من أشعة منتظمة الشدة على لوح حديدي له سمك ثابت فشدة الحزمة النافذة تكون أقل من شدة الحزمة الساقطة لكنها تبقى منتظمة خلال الحزمة النافذة أيضاً. ولو فرضنا ان هناك فجوة هوائية موجودة في اللوح، فستعاني الأشعة التي تمر خلال المنطقة التي فيها الفجوة توهيناً أقل مما تعانيه الأشعة المارة الى بقية أجزاء اللوح الخالية من الفجوات، لأن الهواء الموجود في الفجوة له عدد ذري وكثافة أقل بكثير مما للمادة الحديدية لذلك يكون امتصاص الأشعة قليلاً في منطقة الفجوة. اي تكون شدة الأشعة النافذة من منطقة الفجوة اكثر من شدة الأشعة النافذة من المناطق الاخرى.

ولو فرضنا ان الفجوة أنفة الذكر ملأت بالرصاص (وهو مادة لها عدد ذري وكثافة اعلى من الحديد ومن ثم لها معامل توهين (μ) أكبر)،، فسنلاحظ ظاهرة معاكسة، أي تكون شدة الأشعة المارة خلال الفجوة المملوءة بالرصاص أقل من سواها.

تمتلك الأشعة السينية وأشعة كاما الخواص التالية:

أ- تؤين المادة، مكونة أيونات موجبة وسالبة، لذلك تعرف هذه الأشعة بالأشعة المؤينة، أن مقدار التأين هو دلالة على شدة الأشعة وعليه يمكن استخدامه كمعيار لقياس كمية الإشعاع.

ب- تخترق المادة والى مدى يعتمد على كثافة المادة وسمكها وكتلتها الذرية النسبية وأخيراً الطول الموجي للأشعة. تمتلك أشعة كاما أطوال موجية أقصر بصوره عامة من تلك التي تمتلكها الأشعة السينية، وعليه تكون قدرة أشعة كاما على الاختراق أكبر.

ج- تنتقل بخطوط مستقيمة وبسرعة الضوء.

د- يتم تشتيتها جزئياً من قبل المادة التي تمر فيها، يكون تأثير التشتت أكبر للمادة الأكثر سمكاً.

هـ- تسبب تأثيراً كيمياوياً ضوئياً (photo-chemical effect) في المستحلبات الفوتوغرافية ويستفاد من هذه الخاصية لتكوين صور شعاعية لدراسة العيوب الداخلية في الاجزاء.

و- تولد تآلقاً في بعض المواد. ويستفاد من هذه الصفة عند استخدامها في شاشة عرض منظار التآلق لفحص المواد.

ز- تسبب تأثيرات حيوية مضره؛ وعليه فإن التعرض لها لمدة تفوق المدة الموصى بها مضر لجسم الإنسان الذي تعوزه الحاسة القابله على تحسسها، لذلك يلزم اتخاذ احتياطات الزامية للوقاية من هذه الإشعاعات.

عملية التصوير الشعاعي:

يتم إظهار التغيرات في شدة الأشعة النافذة باستخدام الخواص الأساسية آنفة الذكر للأشعتين كاما والسينية ، حيث تؤثر على المستحلب الضوئي (الفوتوغرافي) أما مباشرة او بتوليد ضوء عن طريق التآلق. فتتحول التغيرات في شدة الشعاع النافذ الى اختلافات في مقدار الاسوداد على فلم التصوير.

تتضمن الصورة الشعاعية اذن مساقط لمختلف اجزاء الجسم المفحوص ، حيث يفهم مما ذكر سابقاً أن بالإمكان تحديد التغيرات في سمك الجسم وطبيعة الاجزاء التي تخترقها الأشعة.

العوامل الهندسية المؤثرة على نوعية الصورة:

يشير الشكل (1-25) الى أن صورة العيب لا تكون حادة المعالم عادةً حيث تحيط بها منطقة شبه الظل. يعود السبب في تكوين هذه المنطقة الى ان مصدر الأشعة ليس نقطياً (Point source) وانما له مساحة معينة بحيث ان صورة اية نقطة في النموذج المفحوص تتوسع ومن ثم تفقد التحديد أو التباين الجيد عند الحواف.

ومن تشابه المثلثين 1 و 2 نستنتج الآتي :

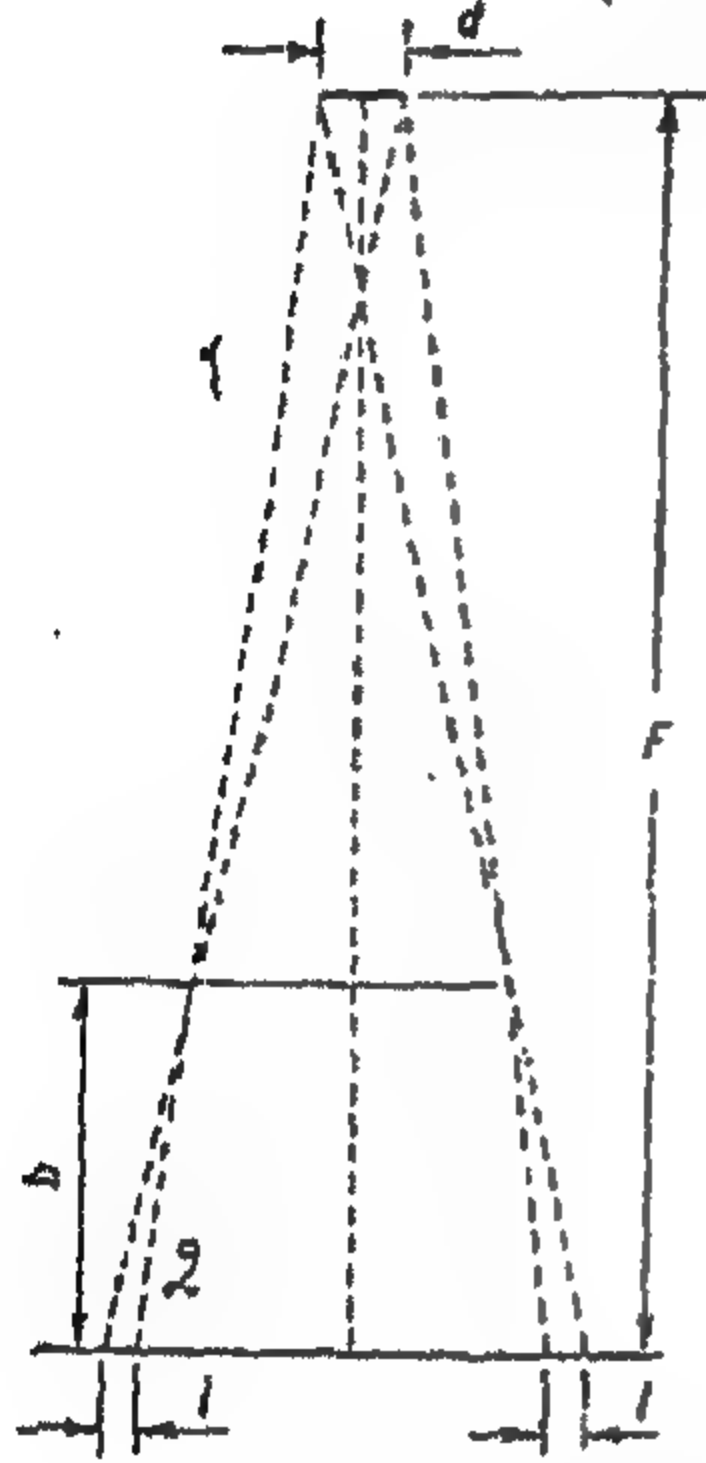
$$\frac{1}{d} = \frac{b}{F-b} \dots\dots\dots(4-1)$$

1: مقدار منطقة شبه الظل

d: قطر مصدر الإشعاع و b المسافة بين العيب وفلم التصوير

F-b: هي المسافة بين مصدر الإشعاع والجسم.

ومن المعادلة يمكن حساب مقدار منطقة شبه الظل إذا علمت العوامل الأخرى. ولتقليل منطقة شبه الظل يجب استخدام مصدر صغير القطر او نقطي اذا أمكن ذلك او زيادة المسافة بين مصدر الإشعاع والجسم وأخيراً تقليل المسافة بين الفلم و الجسم (أي جعل الفلم ملاصقاً للجسم المراد فحصه جهد الإمكان).



ظاهرة شبه الظل

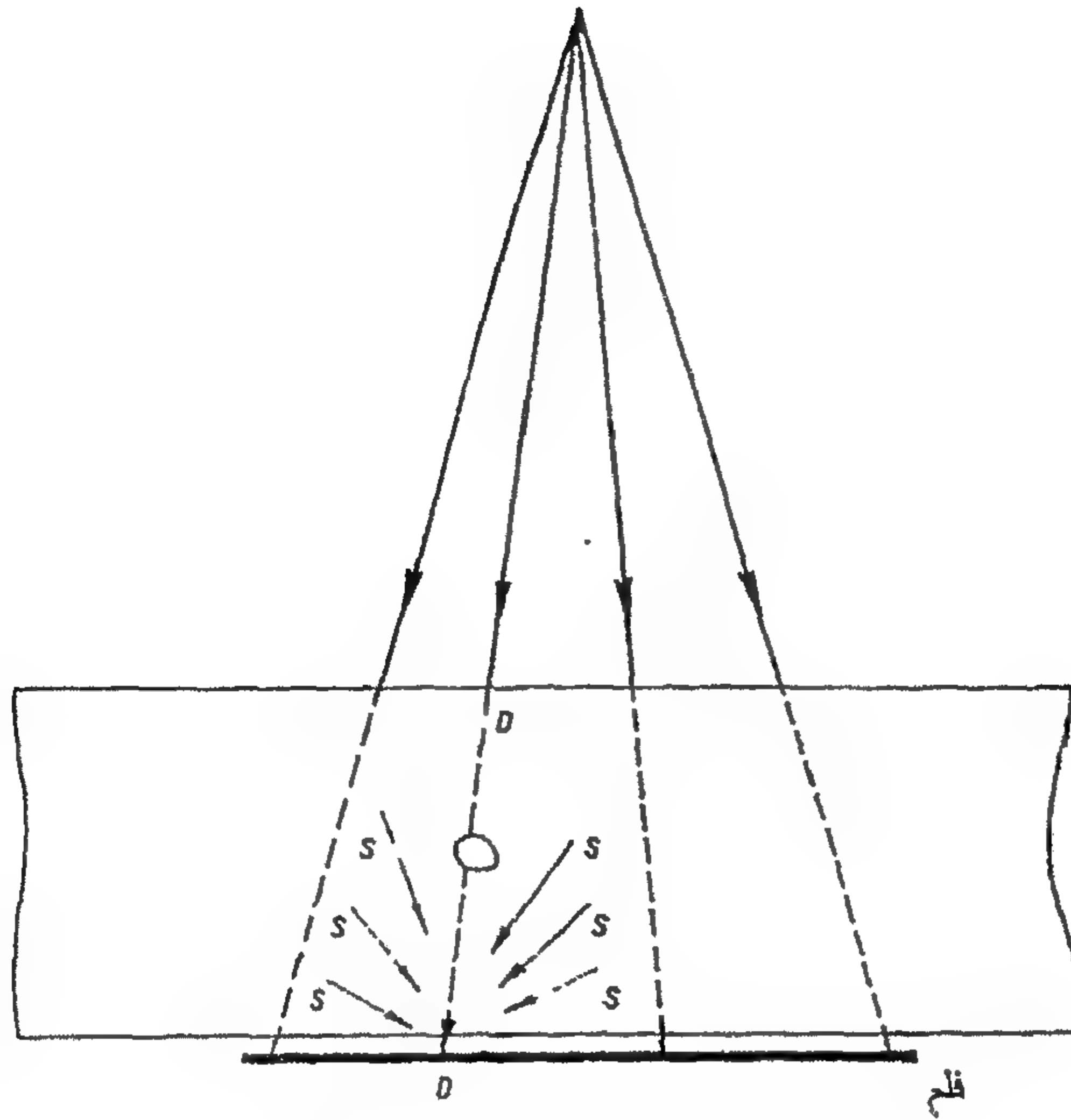
شكل 1-25

صورة العيب أو حافة الجسم لا تكون

حادّة المعالم (تحتوي على شبه الظل)

تشعيت الأشعة:

تقل حساسية الفحص الشعاعي بشكل كبير بسبب الأشعة المشتتة، حيث لا تشترك هذه الأشعة في تكوين صورة العيب كما يظهر من الشكل (1-26). لا يمكن التخلص من الأشعة المشتتة إلا أنه يجب تخفيفها الى أدنى حد ممكن وذلك بتحديد مجال الأشعة السينية الى أدنى حيز (مساحة) مطلوب باستخدام فتحة مناسبة وذلك لتجنب الأشعة المشتتة غير المرغوب فيها والتي تتولد خارج المساحة المراد فحصها. كما يجب حماية الفلم من الأشعة المشتتة من الخلف أي من الجدران والأرضية بواسطة حفظه في علبة محاطة بلوح رصاصي سمكه 2 ملم.



تأثير الأشعة المتشتتة على صورة العيب .

D: أشعة مباشرة S: أشعة مشتتة

شكل 26-1

مصادر الأشعة:

تتألف الأجهزة الأساسية للأشعة السينية المستخدمة في الفحص الشعاعي صناعياً من الأجزاء التالية وهي أنبوبة الأشعة السينية ومولد الفولتية المعجلة والدوائر الكهربائية الرابطة ومنظومة التبريد ثم لوحة السيطرة .

أ- أنبوبة الأشعة:

تكون أنبوبة الأشعة بشكل أساسي من الزجاج المفرغ وفي داخلها المهبط (Cathode) والمربوط بالشعيرة (Filament) أيضاً والمصدر (Anode) حي يكون مربوطاً كهربائياً بالهدف المعدني (Metallic Target) ، الشكل (27-1) .

ب- الشعيرة:

وتتألف من سلك معدني (عادةً من التنكستن) ملفوف بشكلٍ مناسبٍ حيث يبعث الإلكترونات إذا تم تسخينه إلى درجةٍ كافيةٍ . تعتمد كمية الإلكترونات المنبعثة على درجة الحرارة التي تصل إليها الشعيرة ولذا يمكن التحكم بها بسهولة، أي بتغيير التيار (ملي أمبير) المار بالدائرة الكهربائية للشعيرة، يعتبر مقدار التيار المار بالأنبوبة بالملي أمبير مقياساً لشدة الأشعة السينية المنبعثة من الأنبوبة (الشكل 1-23) أي أنها تعتمد على سيل الإلكترونات المعجلة .

ترتبط الشعيرة إلى القطب السالب لدائرة الفولتية المعجلة ويمثل القطب السالب المهبط . أما التيار اللازم لتسخين الشعيرة فيؤخذ من محوله متغيرة ذات فولتية واطئة والتيار عالي نسبياً.

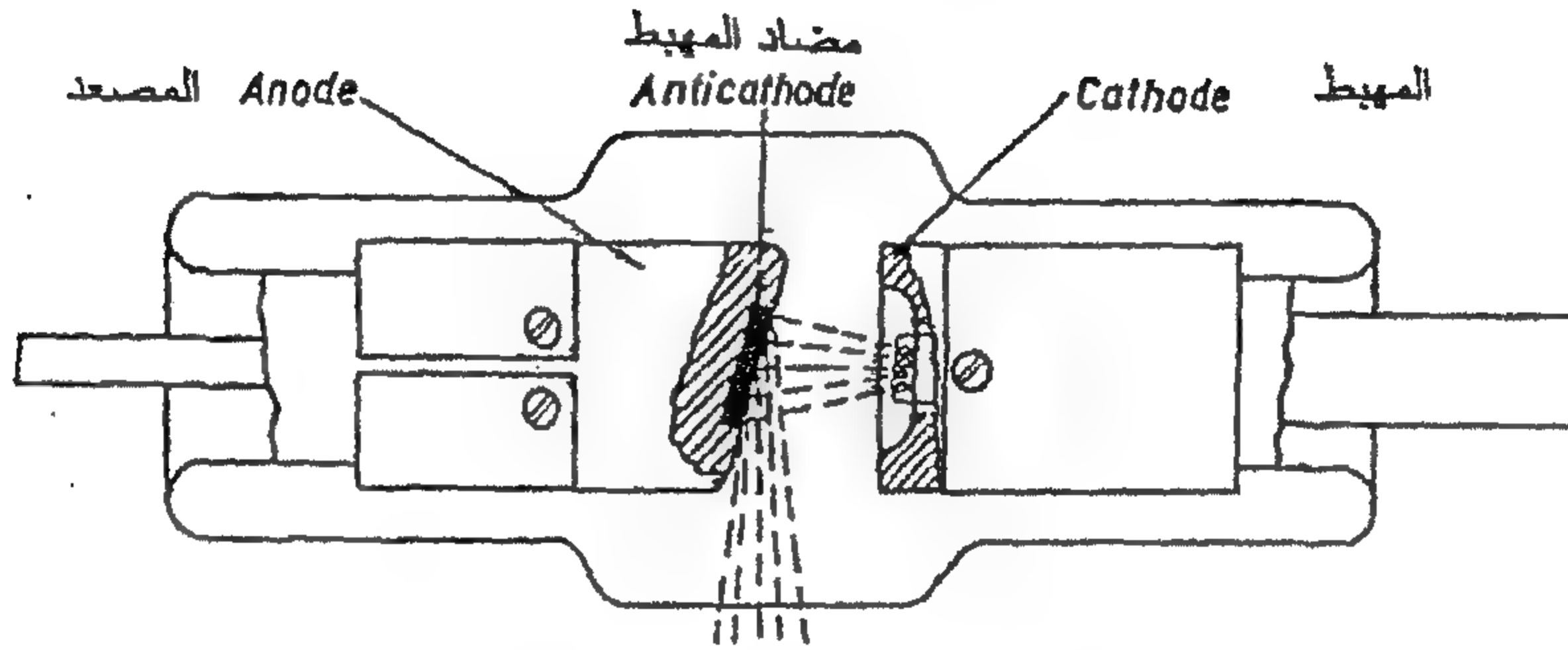
المصعد:

ويتألف من قطعة معدنية جيدة التوصيل للحرارة مثل النحاس تحمل قرصاً ذو شكل ملائم من معدنٍ ذي درجة أنصهار عالية، غالباً التنكستن، يسمى الهدف . تتم إمالة الهدف بزاوية تتراوح بين 60° - 70° بالنسبة لإتجاه الإلكترونات المعجلة الساقطة عليه . يرتبط الهدف إلى القطب الموجب لدائرة الفولتية المعجلة . تستهلك نسبة قليلة (حوالي 1%) من طاقة الإلكترونات المعجلة عند اصطدامها بالهدف لتوليد الأشعة السينية أما الباقي فتتحول إلى حرارة ، لذلك يتحتم تبريد الهدف تبريداً كفوءاً ، خصوصاً عند استخدام فولتيات تعجيل عالية، وإلا قد يصل معدن الهدف إلى درجة حرارة الإنصهار بعد فترة معينة من اشتغال الجهاز ومن ثم تتلف الأنبوبة .

هناك العديد من نظم التبريد المتبعة وتختلف حسب قدرة أنبوبة الأشعة ومواصفات الجهاز . يسود نوعين أساسيين من أنظمة التبريد هما :

١- التبريد بالحمل: وهو التبريد بواسطة تيارات الحمل الهوائية والتي إما أن تكون تيارات طبيعية أو بمساعدة مضخة دفع هوائية .

٢- التبريد بسائل: ويكون التبريد هنا بسائل تبريد يدفع بواسطة مضخة الى المصعد (الهدف) لتبريده ومن ثم امكانية زيادة التيار المار بالأنبوبة. يكون سائل التبريد إما زيتاً أو ماءً في دائرة مغلقة في الغالب .



الشكل 27-1

رسم تخطيطي لأنبوبة الأشعة السينية ذات الاتجاه الواحد

أشعة كاما:

وهي أشعة كهرومغناطيسية أيضاً، كما تم ذكره ، ملائمة للفحص الشعاعي ويتم أشعاعها تلقائياً من المواد أو النظائر النشطة اشعاعياً (Radio active Iso- topes) . تنطلق فوتونات (Photons) أشعة كاما أثناء عملية اضمحلال النواة غير المستقرة.

يكون مصدر أشعة كاما اما مادة مشعة طبيعياً (مثل الراديوم والميزوتورיום والرادون) أو صناعياً حيث يتم انتاج بعض العناصر المشعة باستخدام المفاعلات

النووية، على سبيل المثال، ^{60}Co و ^{134}Cs و ^{192}Ir وغيرها). ونادراً ما تستخدم اليوم المواد المشعة طبيعياً في الفحص الشعاعي صناعياً نظراً لعدم ملائمة خواصها لعملية الفحص.

تشع النظائر المشعة بصورة عامة عدة أنواع من نواتج التفاعلات النووية مثل أشعة ألفا (وهي نوى ذرات عنصر الهيليوم) وبيتا (وهي الكترونات) وكاما (وهي أشعة كهرومغناطيسية كما تم ذكره) وفي بعض الأحيان وعند ظروف معينة تشع نيوترونات (وهي إحدى المكونات الأساسية لنواة الذرة)، ومن الجدير بالذكر أن أغلب النظائر المشعة تبعث أكثر من نوع واحد من الإشعاعات في آنٍ واحد.

ومن الطبيعي أن يكون الإهتمام منصباً، في تقنية الفحص بأشعة كاما، على النظائر الباعثة لأشعة كاما.

تكون طاقة أشعة كاما، المنبعثة من نظير معين، مميزةً لذلك النظير، فهي بذلك لا تشابه الأشعة السينية المنبعثة من أنبوبة الأشعة. تكون طبيعة أشعة كاما على شكل خطوط طيفية ضيقة ذات طاقات مختلفة حسب نوع وطبيعة المصدر المشع.

يعتمد التباين الصوري في الفحص الشعاعي على طاقة الأشعة ، لذلك يجب اختيار النظير الملائم المشع لأشعة كاما على ضوء اعتبارات طبيعية وسمك المادة المراد فحصها ومن ثم ما يتعلق بذلك من زمن تعريض ونوعية الصورة.

النشاط الشعاعي:

يمثل النشاط الشعاعي خاصية مهمة للنظير لأنه يؤثر على زمن التعريض و يعرف بأنه عدد الفوتونات المنبعثة من مصدر الإشعاع بوحدة الزمن . ويعني نشاط مقداره 1 كوري (1 Ci) أن 3.7×10^{10} نواة ذرية تنحل (disintegrate) بالثانية الواحدة، وهو مقياس لعدد الفوتونات التي تنبعث بالثانية الواحدة ، يتراوح النشاط

الإشعاعي لمصادر كما بين عدة مئات من الملي كوري الى 20000 كوري في التقنية الشعاعية للفحص في الصناعة .

الإضمحلال الشعاعي وعمر النصف:

يرتبط نشاط النظائر المشعة ارتباطاً وثيقاً بالإضمحلال الشعاعي، فشدة الأشعة المنبعثة من المصدر الشعاعي ليست ثابتة حيث أنها تتناقص حسب قانون أسي مع الزمن وكالاتي:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots(5-1)$$

حيث تمثل

λ : معامل الانحلال وهو ثابت لكل نظير مشع.

t : زمن الانحلال.

N : عدد النوى غير المضمحلة بعد زمن مقداره t .

N_0 : عدد النوى عندما يكون الزمن $t = 0$ صفراً

e : عدد ثابت $= 2.718$ وهو أساس اللوغاريتم الطبيعي .

ينحل نصف عدد النوى لذلك النظير بعد فترة زمنية تسمى عمر النصف (half - life) ، ويمكن استخراج عمر النصف من المعادلة (5-1) وكالاتي: عند

$$N = \frac{N_0}{2} \text{ تكون } T \text{ انقضاء فترة عمر النصف}$$

وعند تعويض ذلك في المعادلة (5-1) ينتج

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t}$$

ويأخذ لوغاريتم الطرفين يكون

$$T = \frac{6.931}{\lambda} \dots\dots\dots(6-1)$$

تنحل بعض النظائر ببطء شديد ، حيث يبلغ عمر النصف لها عدة سنوات ، في حين ينحل البعض الآخر بسرعة حيث يصبح نشاطها نصف ما كان عليه عند البداية في أيام قليلة (أي أن عمر النصف هو عبارة عن أيام معدودة). هناك بعض النظائر الصناعية لها عمر نصف قليل جداً أي عدة ثواني أو قد يكون أقل من ذلك وسوف لا يتم التطرق لها هنا.

تكون النظائر المشعة التي عمر النصف لها قصير غير ملائمة لأغلب الفحوص الشعاعية.

النظائر المشعة المستخدمة في الفحص الشعاعي صناعياً:

يتضمن الجدول (3-1) في ادناه على خواص أهم النظائر المشعة والأكثر شيوعاً بالإستخدام في الفحص شعاعياً بأشعة كاما.

جدول (3-1) يتضمن أهم المعلومات اللازمة في الفحص بالطريقة الشعاعية صناعياً.

النظير المشع	الرمز	عمر النصف	طاقة الاشعة الاساس (MeV)	النشاط كوري (Ci)	مدى السمك الممكن فحصه للفولاذ (mm)
كوبلت 60	Co 60	5.3 سنة	1.17-1.33	5	150-40
سيزيوم 137	Cs 137	30 سنة	0.663	10	75-25
سيزيوم 134	Cs 134	2.1 سنة	0.48-1.37	10	100-25
ايريديوم 192	Ir 192	74 يوم	0.296-0.468	30	60-10
ثوليوم 170	Tm 170	127 يوم	0.084	15	13-3

يمكن اختبار مصدر أشعة كاما الملائم بموجب المعلومات المتوفرة في جدول (1-3) . يتم الاختبار حسب النوعية المطلوبة للصورة وزمن التعريض وطبيعة الجزء المفحوص إلى آخره. مع العلم أنه ليس هناك مصادر مشعة ملائمة للحومات الفولاذ الرقيقة جداً أو للحومات سبائك الألمنيوم. يستخدم النظير ^{192}Ir للمقاطع الرقيقة عادةً حيث يمتلك نصف عمر قصير نسبياً والذي يتطلب التبديل الدوري للمصدر ، كما يمتلك ^{192}Ir فعالية نوعية عالية وهو متوفر بشدة عالية وقطر صغير.

يمكن استخدام النظير ^{170}Tm في حالة المقاطع الخفيفة جداً من الفولاذ وحتى ملحومات الألمنيوم إلا أن المصادر المتوفرة ذات فعالية واطئة ولذا يلزم زمن تعريض طويل للحصول على صورة واضحة.

يكون من الممكن الاختيار بين استخدام تقنية الأشعة السينية أو النظائر المشعة فقط عندما تتوفر كافة المعلومات بصورة مضبوطة للتطبيق المعين.

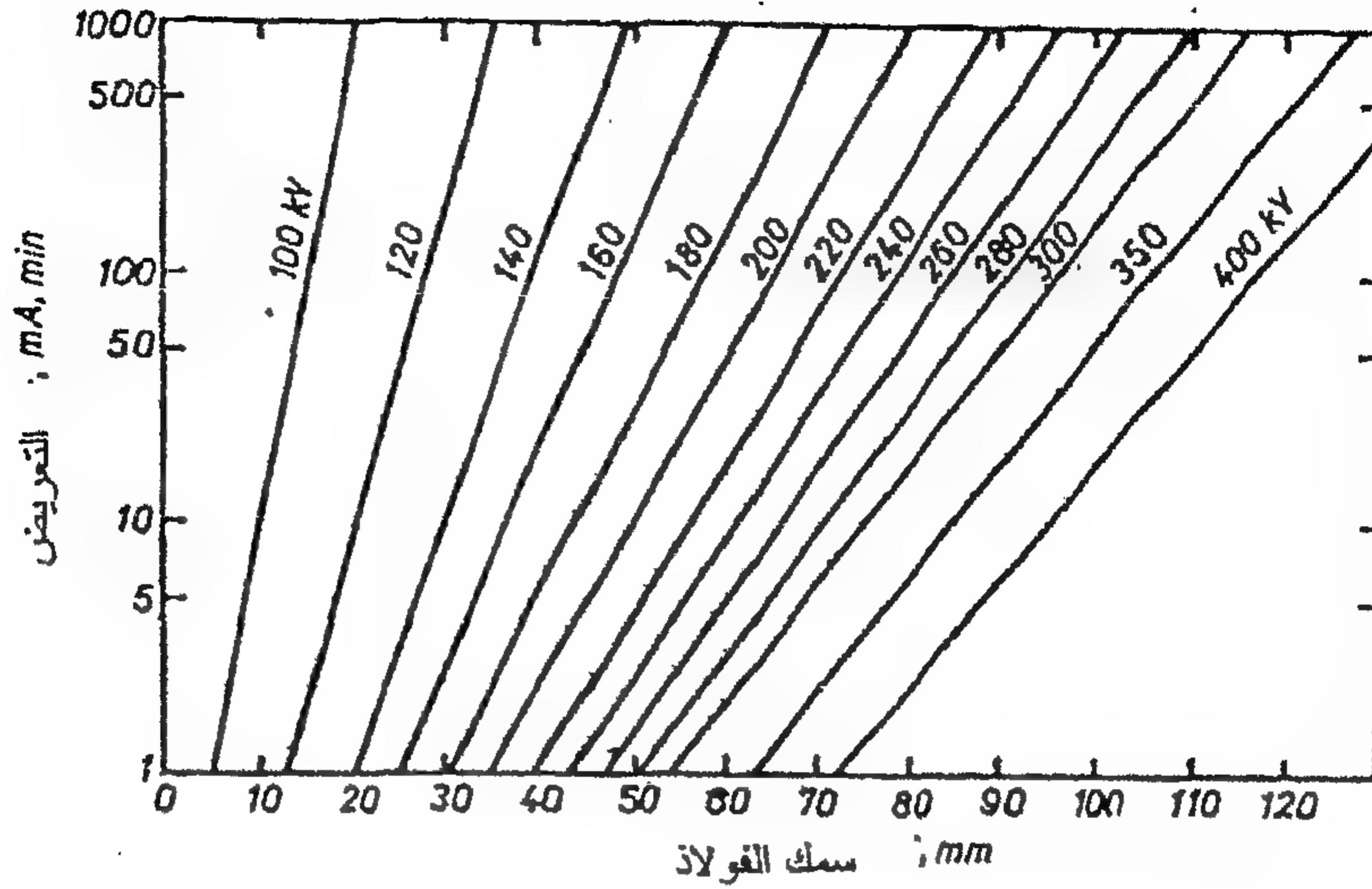
يمكن الفحص ، تحت ظروف خاصة، بعدة إتجاهات عند استخدام المصادر المشعة لأن الأشعة تنبعث منها بكل الاتجاهات فيمكن عندئذ وضع المصدر المشع في مركز كره، على سبيل المثال، ووضع النماذج حوله أو إذا أريد فحص جسم كروي مجوف فيمكن استخدام هذه التقنية، حيث أن هذه الميزة غير متوفرة بهذه المرونة في جهاز الأشعة السينية.

المقارنة بين أشعتي كاما والسينية:

يمكن المقارنة بين تقنيتي أشعة كاما والأشعة السينية من حيث المميزات والمساوئ أو القصور في كل منهما كما في الجدول (1-4).

جدول (1-4) المقارنة بين كل من تقنيتي الفحص بأشعة كاما والأشعة السينية:

الأشعة السينية (X-rays)	أشعة كاما (Gamma-rays)
- تتطلب مزود للقدرة الكهربائية ، أما من الخط الكهربائي الأساسي أو من مولد. وهناك في دور التطوير أجهزة تعمل بالبطاريات.	- لا تتطلب أي قدرة كهربائية، مع أن بعض اوعية الحماية من الإشعاع تعمل كهربائياً.
- يلزم ملاحظة المقاييس الكهربائية وضبطها أثناء التعريض (العمل) عندما يتطلب الامر ذلك.	- لا تحتاج الى أي إشراف ماعدا لأغراض السلامة من الإشعاع.
- الأجهزة ثقيلة وكبيرة بشكل عام.	- المصدر المشع مع اوعية الحماية من الإشعاع خفيفة الوزن، إلا في أحوال معينة.
- نصب الاجهزة يستغرق بعض الوقت. وفي بعض الأحيان ليس من السهولة تحقيقه.	- من السهولة نقلها ونصبها عدا في حالة Co-60 حيث تكون الأجهزة كبيرة نسبياً.
- يكمن الخطر من الأشعة خلال التعريض حيث أن الجرعة تكون عالية نسبياً أثناء هذه المدة.	- الخطر مستمر لأن الأشعة تنبعث من المصدر تلقائياً وباستمرار. لذا يجب الحذر و المراقبة بصورة مستمرة حتى أثناء النقل والخزن.
- يمكن التحكم بطاقة الأشعة المنبعثة (الطول الموجي) وحسب المتطلبات وذلك بتغيير الفولتية المعجلة.	- لا يمكن التحكم بطاقة الأشعة المنبعثة للمصدر المشع. ويوجد عدد محدد فقط من النظائر المشعة الملائمة.
- تخرج الأشعة من الأنبوبة عادةً على شكل مخروط زاويته 60° محوره عمودياً على اتجاه الأنبوبة. وهناك بعض الأنبوبات الخاصة أيضاً.	- تنبعث الأشعة في كل الاتجاهات، ولغرض السلامة من الإشعاع يغلف المصدر من الجهات غير المطلوبة بحاجز خاص لإمتصاص الأشعة.
- يمكن التعريض لفترات قصيرة عند فحص أجسام ذات سمك اعتيادي.	- تكون فترة التعريض طويلة بصوره عامة (قد تصل الى عدة ساعات).
- للحصول على تباين جيد يتم اختيار طاقة أشعة (طول موجي) ملائمة حسب سمك ومادة الجزء المفحوص.	- مجال الاختيار قليل جداً (وذلك لقلة المصادر المشعة الملائمة) وكنتيجه لذلك يكون التباين الصوري ، دائماً تقريباً، أقل مما هو عليه في الأشعة السينية.
- ثمن الأجهزة عالي كما ان كلفة الصيانة عالية نسبياً أيضاً.	- الكلفة الأولية للأجهزة والصيانة منخفضة. أما كلفة مستلزمات الوقاية من الإشعاع ومتعلقاتها فتكون عالية.



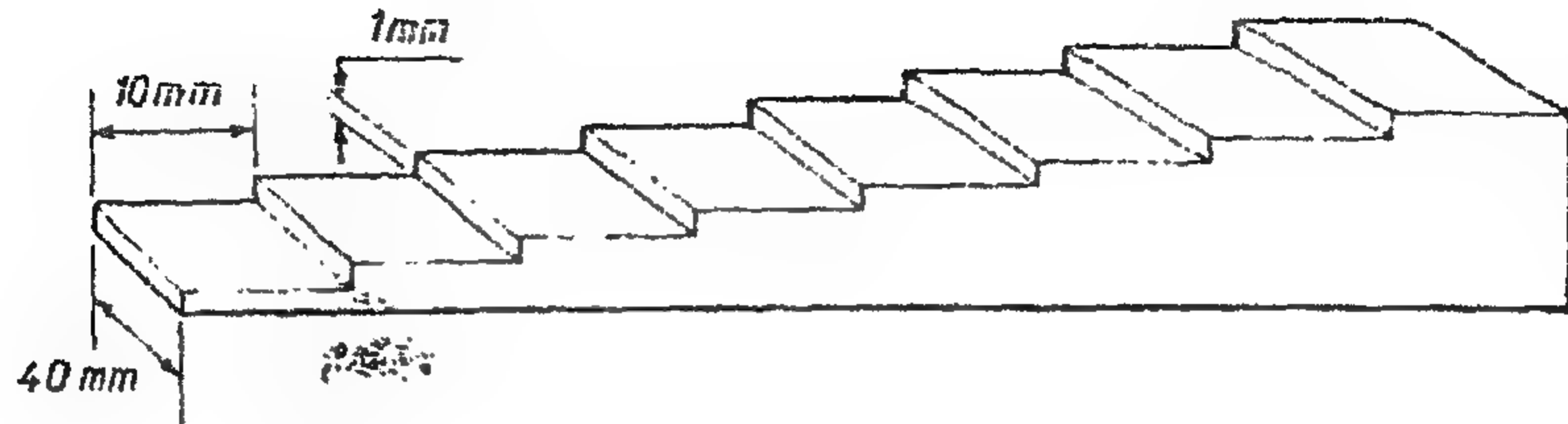
الشكل (28-1)

نموذج لمقدار التعريض عند فولتيات مختلفة ولمختلف أسمك الفولاذ

تعيين فترات (أزمات) التعريض:

تزود أجهزة الأشعة السينية بلوحات خاصة تحتوي على منحنيات مرسومة بين زمن التعريض والسمك لمواد مختلفة كالفولاذ والألمنيوم وغيرها ولمختلف الفولتيات كما في الشكل (28-1)، على سبيل المثال.

ومع ذلك فقيم هذه المنحنيات تؤخذ كمؤشرات أولية للعمل حيث يعتمد عادةً على الخبرة المكتسبة خلال العمل. يمكن رسم مثل هذه المنحنيات إذا تطلب الأمر ذلك، حيث يتم أخذ عدة صور شعاعية لدرج من الفولاذ سمك كل خطوة (عتبه) فيه 1 ملم (الشكل 29-1) ولأزمان مختلفة ثم تعاد العملية لعدة فولتيات، يتم رسم المنحنيات باعتبار المحور الصادي ممثلاً لحاصل التيار المار في الأنبوبة (بالملي أمبير) \times زمن التعريض (بالدقيقة غالباً) أما السمك فيؤخذ على المحور السيني.



الشكل (1-29) قطعة مدرجة قياسية من الفولاذ .

تقييم نوعية الصورة : Image quality assessment

يعتمد الكشف عن العيب أو الخلل في الصورة الشعاعية على حدة معالم صورة العيب وتباينها، وكليهما يعتمد بدوره على التقنية المستخدمة. تعتمد حدة المعالم على عدة عوامل منها قطر مصدر الأشعة والمسافة بين المصدر و الفلم، كما أسلفنا، ونوع الفلم والحواجز المستخدمة. أما التباين فيعتمد على الفولتية المعجلة في حالة الأشعة السينية ونوع مصدر أشعة كما ونوع الفلم والحواجز وطريقة إظهار الصورة (التحميض).

لذا تعتمد نوعية الصورة على هذه العوامل مجتمعة. يمكن اعتبار أحسن نوعية لصورة العيب هي الأدق حدة لمعالم العيب والتباين الصوري العالي له.

ولتخمين نوعية الصورة فمن المعتاد تسجيل صورة أداة (كاشف نوعية الصورة "Image Quality Indicator "IQI") مصنوعة من نفس مادة الجزء المراد فحصه أو من مادة مشابهة على نفس الفلم وفي نفس الوقت أثناء عملية الفحص. يتألف الكاشف من أجزاء ذات سمك مختلف حيث يوضع على الجزء المراد فحصه بحيث يكون مواجه لمصدر الأشعة. فتكون أحسن نوعية للصورة عند الظهور الأحسن لأرق أو أدق أجزاء الكاشف.

كواشف نوعية الصورة (IQI):

هناك عدة أنواع من الكواشف ومن أهمها نوعين أحدهما يتألف من أسلاك مختلفة الأقطار والآخر من قطعة معدنية متدرجة في السمك بخطوات (عتبات) تحتوي على ثقوب. وقد تبنت بعض المؤسسات والمنظمات العلمية هذين النوعين مثل الجمعية العالمية للحام ومؤسسة المقاييس الألمانية والإنكليزية وغيرها.

الكاشف ذو الأسلاك:

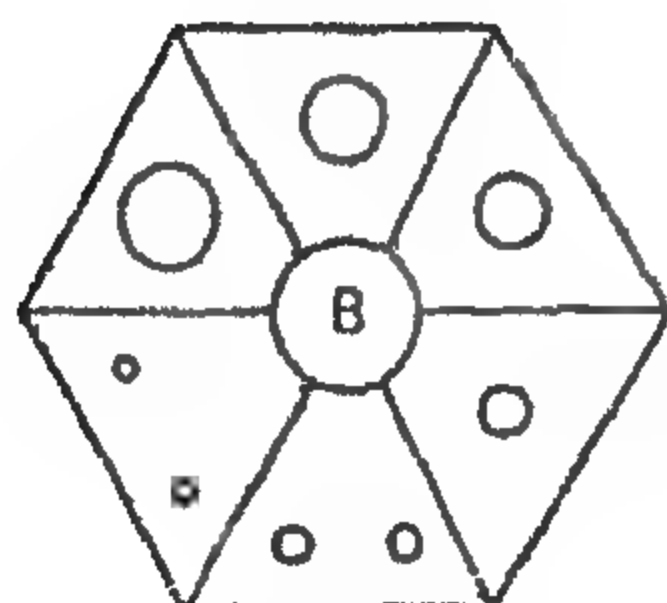
ويتألف هذا النوع من سلسلة من الأسلاك ذات طول ثابت، حوالي 50 ملم ، موضوعة جنباً إلى جنب بشكل متواز مفصولة عن بعضها بحدود 5 ملم مرتبة بالتعاقب حسب الزيادة في القطر ، جدول (5-1) وشكل (1-30). توضع هذه الأسلاك في ثلاثة أكياس صغيرة من النايلون الشفاف بحيث تتكون منها ثلاث مجموعات، تمثل المجموعة الأولى الأسلاك ذات الأقطار الصغيرة والثانية ذات الأقطار المتوسطة ثم الثالثة ذات الأقطار الكبيرة نسبياً.

جدول 5-1 أقطار أسلاك كاشف نوعية الصورة حسب المواصفات البريطانية BS 3971

رقم السك	قطره (ملم)	رقم السك	قطره (ملم)	رقم السك	قطره (ملم)
1	0.032	8	0.160	15	0.80
2	0.040	9	0.200	16	1.00
3	0.050	10	0.250	17	1.25
4	0.063	11	0.320	18	1.60
5	0.080	12	0.400	19	2.00
6	0.100	13	0.500	20	2.50
7	0.125	14	0.630	21	3.20

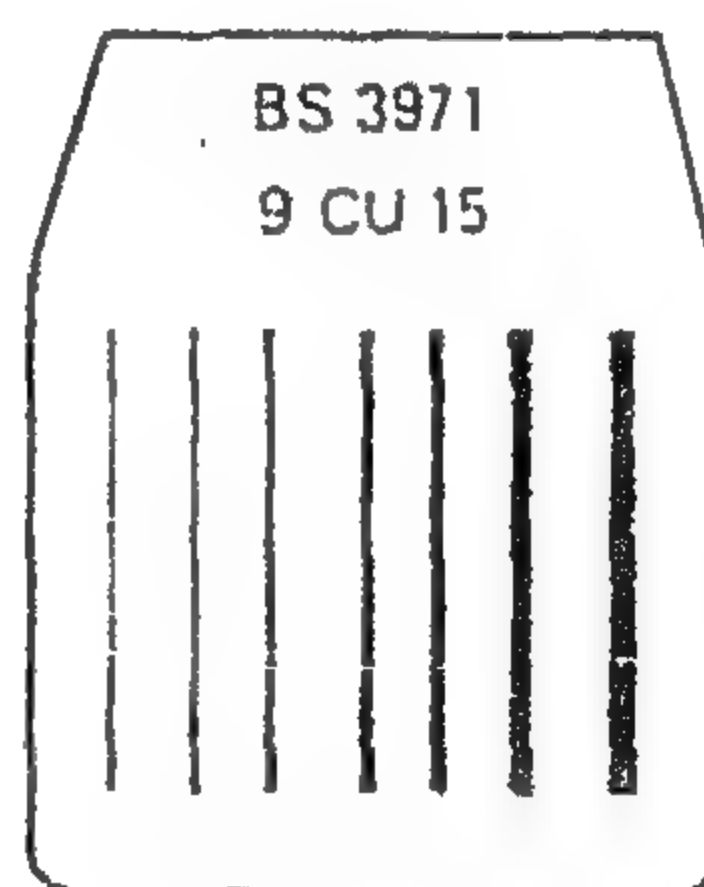


(a)



BS 3971
7 FE 12

(b)



(c)

الشكل 30-1

بعض أنواع كواشف نوعية الصورة حسب المواصفات القياسية البريطانية
(a) النوع المثقب المدرج (b) النموذج السداسي (c) النوع السلبي.

الكاشف المدرج المثقب:

ويتألف من لوح أو عدد من الألواح لها أسماك مختلفة بالتدرج وكل خطوه (عتبه) فيها ثقب أو ثقبين دائريين لها قطر مساوٍ لسماك الخطوه (العتبة) نفسها، كما في جدول (6-1) وشكل (1-30). تكون عدد قطع الكاشف ثلاثة عادة، تحتوي كل واحدة منها على ستة عتبات في كل عتبة ثقب أو ثقبان قطر كل منها مساوٍ لسماك تلك العتبة الواقع فيها.

تعيين حساسية كاشف نوعية الصورة (تقييم نوعية الصورة):

يمكن حساب حساسية التقنية عند استخدام كاشف نوعية الصورة من النوع السلكي أو اللوح المحتوي على ثقب وكالاتي حيث يتم التعبير عنها بنسبة مئوية.

$$\text{الحساسية} \% = \frac{\text{قطر أصغر سلك أو أصغر ثقب مرئي في الصورة}}{\text{سمك الجزء المفحوص}} \times 100$$

جدول 6-1 أقطار ثقب كاشف نوعية الصورة المساوية لسماك العتبة الموجودة فيها بموجب المواصفات البريطانية BS 3971.

رقم العتبة	سمك العتبة أو قطر الثقب الموجود فيها (مم)	رقم العتبة	سمك العتبة أو قطر الثقب الموجود فيها (مم)
1	0.125	10	1.00
2	0.160	11	1.25
3	0.200	12	1.60
4	0.250	13	2.00
5	0.320	14	2.50
6	0.400	15	3.20
7	0.500	16	4.00
8	0.630	17	5.00
9	0.800	18	6.30

تعتبر قيم نوعية الصورة (أي ظهور قطر صغير في الصورة عند استخدام الكاشف كمؤشر لصحة ودقة التقنية الشعاعية وتعتمد العملية على سمك الجزء المراد فحصه وطبيعة مادته. يبين الجدول (1-7) أي قطر من الثقوب أو من الأسلاك يفترض ظهوره للدلالة على الاستخدام الصحيح للتقنية الشعاعية ولمادة الفولاذ ، علماً بأن الأبعاد مأخوذة بالمليمتر.

الجدول (1-7) أقطار الثقوب أو الأسلاك المطلوب ظهورها عند الفحص شعاعياً بالأشعة السينية ولأسماك مختلفة من مادة الفولاذ .

الرؤية المطلوبة		لأسماك الفولاذ	
للثقوب ذات الأقطار	للأسلاك ذات الأقطار	الأقل أو المساوي لـ	الأعلى من
0.5mm	0.2mm	16mm	10mm
0.63	0.25	25	16
0.8	0.32	32	25
1.0	0.4	40	32
1.25	0.5	50	40
1.25	0.63	80	50

أما الجدول 8-1 فيبين أقطار الثقوب أو الأسلاك المطلوب ظهورها عند الفحص شعاعياً بأشعة كاما الناتجة من النظير Ir 142 وعلاقاتها بالأسماك المختلفة للفولاذ.

الجدول 8-1 أقطار الثقوب أو الأسلاك المطلوب ظهورها عند الفحص بأشعة كاما (Ir192) ولأسماك مختلفة من الفولاذ (الأبعاد بالمليمتر).

الرؤية المطلوبة		لأسماك الفولاذ	
للثقوب ذات الأقطار	للأسلاك ذات الأقطار	الأقل أو المساوي لـ	الأعلى من
0.8	0.4	16	10
0.8	0.4	25	16
1.0	0.5	32	25
1.0	0.5	40	32
1.25	0.63	50	40
1.25	0.63	80	50
1.6	1.0	100	80

يبين الجدول (9-1) المعلومات اعلاه لأشعة كاما الناتجة من النظير Co 60. تفسير صورة الفلم الشعاعية:

يجب ملاحظة الجزء المراد فحصه جيداً قبل عملية التشعيع وتعيين كل العيوب السطحية وتحديد مكانها جيداً حذراً من حصول الإلتباس بين صور العيوب السطحية والداخلية . ويتم ذلك بواسطة وضع علامات تزيد أو تقلل من سمك النموذج.

جدول (9-1) أقطار الثقوب أو الأسلاك المطلوب ظهورها عند الفحص شعاعياً بأشعة كاما (Co 60) ولأسمك مختلفة من الفولاذ (الأبعاد بالمليمتر).

الرؤية المطلوبة		لأسمك الفولاذ	
للثقوب ذات الأقطار	للأسلاك ذات الأقطار	الأقل أو المساوي لـ	الأعلى من
1.25	0.8	32	25
1.25	1.0	40	32
1.6	1.0	50	40
1.6	1.25	80	50
2.0	1.25	100	80

وقد تم وضع مصطلحات وحروف لتشير الى كل من أنواع العيوب الداخلية، كما أن وصف وصفات بعض هذه العيوب مدرجة في الجدول (10-1).

جدول (10-1) وصف المظهر الشعاعي للأنواع الأساسية من العيوب .

اسم العيب	الوصف	مظهره في فلم الصورة الشعاعية
A- فجوات غازية Aa مسامية	فجوات ناتجة من انحصار الغازات	ظلال داكنة السواد حادة المعالم ذات أشكال دائرية .
Ab أنبوبية	فجوات مستطيلة او انبوبية ناتجة من انحصار الغازات	ظلال داكنة السواد حادة المعالم ذات أشكال دائرية او مستطيلة اعتماداً على اتجاه العيوب .
B- اكتنافات الخبث Ba لها أشكال مختلفة وفي اتجاهات مختلفة Bb خطوط خبث	انحصار خبث او أية مادة غريبة أثناء الصهر او اللحام فجوات مستطيلة تحتوي على خبث او أية مادة غريبة أخرى اكتنافات خبث ناتجة من التقنية الخاطئة لدرز اللحام .	ظل داكن ذو شكل غير منتظم . خطوط داكنة موازية لحافات اللحام . خطوط داكنة
C- عدم الانصهار التام أثناء اللحام	عيبه ذو بعدين ناتج عن نقصان الالتحام بين معدن اللحام والمعدن الأساس .	خط داكن خفيف ذا حافات حادة . اعتماداً على اتجاه العيب نسبة الى اتجاه حزمة الأشعة السينية . وقد يميل الخط الى ان يكون متعرجاً منتشرأ .
D- النفوذ غير المكتمل في منطقة اللحام	نقصان في الإنصهار في جذر منطقة اللحام او فسحه متبقية نتيجة لفشل اللحام من ملء الجذر .	خط متصل او متقطع في وسط منطقة اللحام .
E- شقوق Ea - شقوق طولية Eb - شقوق عرضية	عدم تواصل متولد عن انهيار في المعدن	خط اسود خفيف ، مستقيم او ملتوي الاتجاه .
F- القطع التحتي	اخدود او قناة في سطح اللوح على طول حافة اللحام .	خط داكن ، وفي بعض الأحيان عريض ومنتشر ، على طول حافة منطقة اللحام .

٢- الفحص بالنيوترونات شعاعياً:

ان الفحص الشعاعي بالنيوترونات هو نواع من أنواع الفحص اللاأتلافي الذي يستخدم فيه نوع معين من الأشعة الدقائقية التي تسمى النيوترونات لتكوين صور شعاعية للجزء المراد فحصه.

تتشابه القواعد الأساسية لتكوين الصورة وتباين الامتصاص مع سمك الجزء والعوامل الأخرى التي تتحكم في زمن التعريض والعمليات اللاحقة مع تلك المستخدمة في الطريقة الشعاعية عند استعمال الأشعة السينية وأشعة كاما.

تأتي أهمية الفحص بالنيوترونات في تحسين التباين الصوري في المواد المنخفضة العدد الذري والتميز بين النظائر أو فحص النماذج المشعة.

النيوترونات هي جسيمات دقيقة تتصف بأن لها كتلة كبيرة نسبياً وذات شحنة متعادلة.

يختلف امتصاص النيوترونات عن امتصاص الأشعة السينية في ان عملية الامتصاص أو التوهين هي عملية تفاعل مع النوى بدلاً من أن تعتمد على التفاعل مع الإلكترونات المدارية حول النواة.

يمكن انتاج النيوترونات من المفاعلات النووية والمعجلات أو بعض النظائر المشعة وجميعها تبعث نيوترونات عالية الطاقة نسبياً (نيوترونات سريعة) وحيث ان أغلب الفحص الشعاعي بالنيوترونات يتم باستخدام نيوترونات ذات طاقة منخفضة (نيوترونات حرارية) تكون طاقاتها بين 0.01 الى 0.3 الكترون فولت ، فمصادر النيوترونات تحاط عادةً بمهديء (moderator) وهو مادة تختزل الطاقة الحركية للنيوترونات بدون ان تخفّض شدتها بصورة ملحوظة.

لا تتم عملية التصوير بالنيوترونات بواسطة التصوير المباشر على الفلم، لأن النيوترونات لا تؤثر بدرجة كافية على مستحلب التصوير المستخدم في افلام الأشعة السينية.

يصطدم شعاع النيوترونات في بعض هذه التقنيات بحاجز مصنوع من مادة

الدائسبروزيوم (dysprosium) او الانديوم (indium) حيث تمتص النيوترونات وتصبح نظير مشعاً تـضمحل بعمر نصف قصير. وفي هذه الطريقة يعرض الحـاجز لوحدـه لحزمة النيوترونات ثم يتم جعله على تماس مع الفلم آنيا وذلك بتقنية مؤتمته. وقد تتم بطريقة أخرى وذلك بتعريض الحـاجز، الذي يبعث أشعة ثـانوية ، مباشرة مع الفلم عند التعريض لحزمة النيوترونات.

تختلف الطريقة الشعاعية بالنيوترونات عن الطريقة الشعاعية المألوفة في أن توهين النيوترونات عند مرورها بالنموذج له علاقة بوجود بعض النظائر بدلاً من الكثافة أو العدد الذري. تتوهن الأشعة السينية بدرجة أكبر بالعناصر ذات العدد الذري العالي من العناصر ذات العدد الذري المنخفض أي أن هذه الظاهرة تتأثر بتغير العدد الذري. إضافة إلى أن الأشعة السينية تتوهن أكثر في المواد عالية الكثافة مما هي عليه في المواد منخفضة الكثافة. أما التوهين بالنسبة إلى النيوترونات الحرارية فيقل مع ازدياد العدد الذري بشكل عام، مع أن العلاقة ليست بتلك البساطة بينهما. وبالإضافة إلى ذلك فإن بعض العناصر الخفيفة كالهيدروجين و الليثيوم والبورون وبعض العناصر المتوسطة إلى الثقيلة وخصوصاً الكاديوم وساماريون ويوروبيوم والكاديونيوم والدائسبروزيوم وكذلك بعض النظائر الخاصة لها سعة استثنائية عالية على امتصاص النيوترونات الحرارية. ويعني هذا أن الفحص الشعاعي بالنيوترونات له القدرة على كشف هذه العناصر أو النظائر ذات التوهين العالي عند وجودها في جزء أو بنيتها سعتها الامتصاصية أقل.

تشمل التطبيقات العملية لهذه التقنية فحص المتفجرات المغلفة بمعدن وقطع المعادن المربوطة بمادة لاصقة والمواد المركبة (Composites) المقواة بألياف البورون وفحص طبقات الهيدريدات المرسبة على طبقات معدنية.

يمكن أيضاً استخدام النيوترونات للكشف شعاعياً عن بعض النظائر كـبعض نظائر الهيدروجين والكاديوم واليورانيوم، كما أن بعض المواد غير حساسة لأشعة كاما أو الأشعة السينية كأجزاء وقود المفاعل النووي وفي هذه الحالة يمكن فحصها بالنيوترونات شعاعياً.

والواقع فإن ميزات (صفات) الفحص الشعاعي بالنيوترونات تكمل تلك التي يتمتع بها الفحص الشعاعي بالأشعة السينية أو أشعة كاما ، فهذه التقنية لها القدرة على فحص بعض المركبات أو الأجزاء التي تعجز عن تحقيقها التقنيات الشعاعية الأخرى.

تستخدم النيوترونات الحرارية بشكل واسع في الفحص لقابليتها العالية على تمييز بعض المواد.

يوضع الجزء المراد فحصه في مسار حزمة النيوترونات امام جهاز كشف الصورة (الكاشف). يمكن الحصول على حزمة النيوترونات من المفاعل النووي والمصادر المشعة أو المعجلات (accelerators). يشتمل الجدول (11-1) على بعض أنواع مصادر النيوترونات الحرارية .

جدول 11-1 بعض أنواع مصادر النيوترونات الحرارية

نوع المصدر	الشدة الشعاعية النموذجية*	قدرة التمييز	زمن التعريض	الخواص
نظائر مشعة	10 ⁴ الى 10 ⁶	ضعيفة الى متوسطة	طويل	عملية مستقرة، منخفض الى متوسط الكلفة، ممكن حملها.
المعجلات (فإن ديكرافت ومولد (d,T) وآلات الأشعة السينية عالية الطاقة)	10 ³ الى 10 ⁶	متوسطة	معتدل	العملية على نحو متقطع، متوسطة الكلفة، قد يمكن حملها
التجميع قبيل الحرج Subcritical assembly	10 ⁴ الى 10 ⁶	جيد	متوسط	عملية مستقرة، متوسط الى عالي الكلفة، يصعب حملها
مفاعل نووي	10 ⁵ الى 10 ⁸	ممتازة	قصير	متوسط الى عالي الكلفة، يصعب حمله

* وحدات الشدة هي نيوترون على السنتمتر المربع في الثانية.

تتوفر في الوقت الحاضر عدد من المصادر المشعة والجدول (1-12) يتضمن بعض النظائر المشعة المستخدمة عادةً.

توهين حزمة النيوترونات (Attenuation of Neutron Beam) :

تتفاعل الإلكترونات والأشعة الكهرومغناطيسية مع الإلكترونات المدارية التي تحيط بالنواة، في حين أن النيوترونات تتفاعل مع نوى الذرات فقط، فتنحرف النيوترونات عند التفاعل مع النوى وأحياناً يتم امتصاص النيوترون من قبل النواة. فعند اصطدام النيوترون بالنواة، وينحرف فقط، يعطي جزءاً من طاقته الحركية إلى الذرة. فعندئذ يتحرك كل من النيوترون والذرة باتجاهين مختلفين عن الاتجاه الأساس لحركة النيوترون. تعرف هذه العملية بالإستطارة (Scattering) وهي:

أ- تخفض الطاقة الحركية للنيوترون.

ب- احتمالية مرور النيوترون خلال الجزء المراد فحصه بالإتجاه الذي يسمح للجهاز بكشفه عند وضعه خلف الجزء.

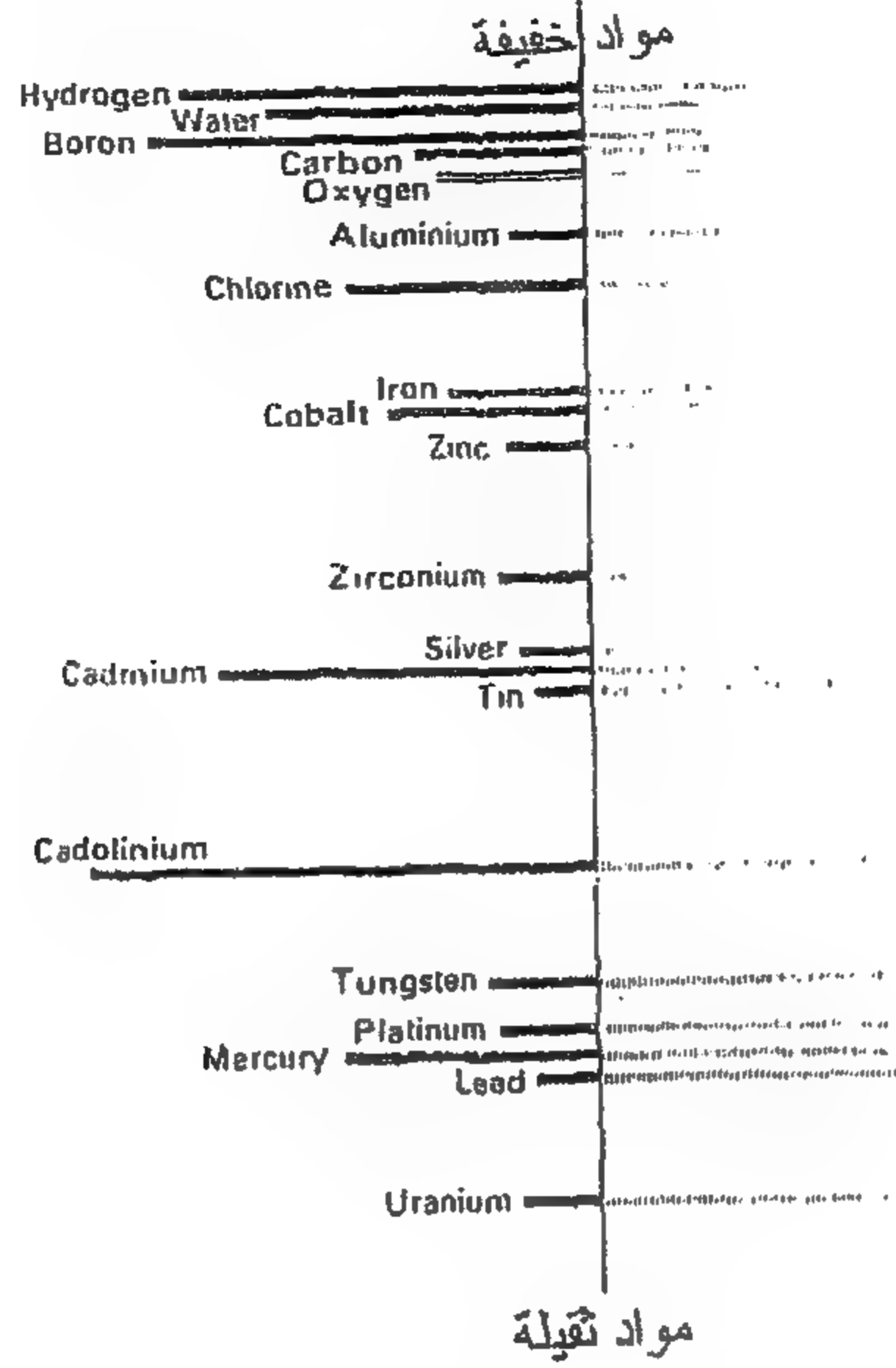
يحصل امتصاص حقيقي للنيوترونات عندما تؤسر من قبل النوى . يبين جدول (1-12) خواص عدة نظائر مشعة تستخدم للفحص الشعاعي بالنيوترونات الحرارية.

النظير	تفاعل النيوترون	عمر النصف	الصفات
$Sb^{124}-Be$	(n - γ)	60 يوم	عمر نصف قصير، خلفية عالية من أشعة كاما، طاقة النيوترونات واطئة ومن السهولة أن تصبح حرارية، منخفضة الكلفة، مقدار عالي من النيوترونات.
$Po^{210}-Be$	(α - n)	138 يوم	عمر نصف قصير، خلفيه واطئة من أشعة كاما، منخفض الكلفة.
$Am^{241}-Cm^{242}-Be$	(α - n)	163 يوم	عمر نصف قصير، ناتج عالي من النيوترونات، كلفة متوسطة.
$Cm^{244}-Be$	(α - n)	18.1 سنة	عمر نصف طويل، خلفية واطئة من أشعة كاما ، منخفض الكلفة.
Cf^{252}	انشطار تلقائي	2.65 سنة	عمر نصف طويل، حجم صغير، طاقة النيوترونات واطئة ومن السهولة أن تصبح حرارية. ناتج عالي من النيوترونات.

تنتقل النواة الأسيرة، نتيجة لأسرها للنيوترون، الى النظير الأعلى لنواة الهدف وفي بعض الأحيان تتولد نواه غير مستقرة حيث تعاني فيما بعد من اضمحلال شعاعي. ان احتمالية التصادم بين النيوترون والنواه والتي تؤدي الى الأسر تعرف بالمقطع العرضي للأسر (Capture Cross section) ويتم التعبير عنها بالمساحة المؤثرة للذرة الواحد. يتغير المقطع العرضي للأسر مع طاقة النيوترون والعدد الذري. أما بالنسبة الى النيوترونات الحرارية (طاقتها حوالي 0.025 الكترون فولت "ev") فيتغير المقطع العرضي للأسر بصورة عشوائية مع العدد الذري فهو عالي لبعض العناصر ومنخفض نسبياً لعناصر أخرى. يكون تفاعل النيوترونات مع معظم المواد اقل مقارنةً مع الإشعاعات المخترقة الأخرى لذلك تستخدم النيوترونات أحياناً لفحص سمك أكبر مما يتوقع استخدامه في حالة الأشعة الكهرومغناطيسية. يبين الشكل (1-31) مقارنة بين امتصاص بعض المواد للأشعة الكهرومغناطيسية والنيوترونات. يمكن التعبير عن التأثير المشترك للإستطارة والأسر بمعامل امتصاص الكتلة حيث يستخدم هذا المعامل لتعيين عامل التعريض في الفحص الشعاعي بالنيوترونات للجزء المراد فحصه. يتغير التوهين لماده معينه أسياً مع السمك عند الفحص بالنيوترونات تماماً كما في حالة الأشعة الكهرومغناطيسية حيث سبق شرح ذلك بشيء من التفصيل.

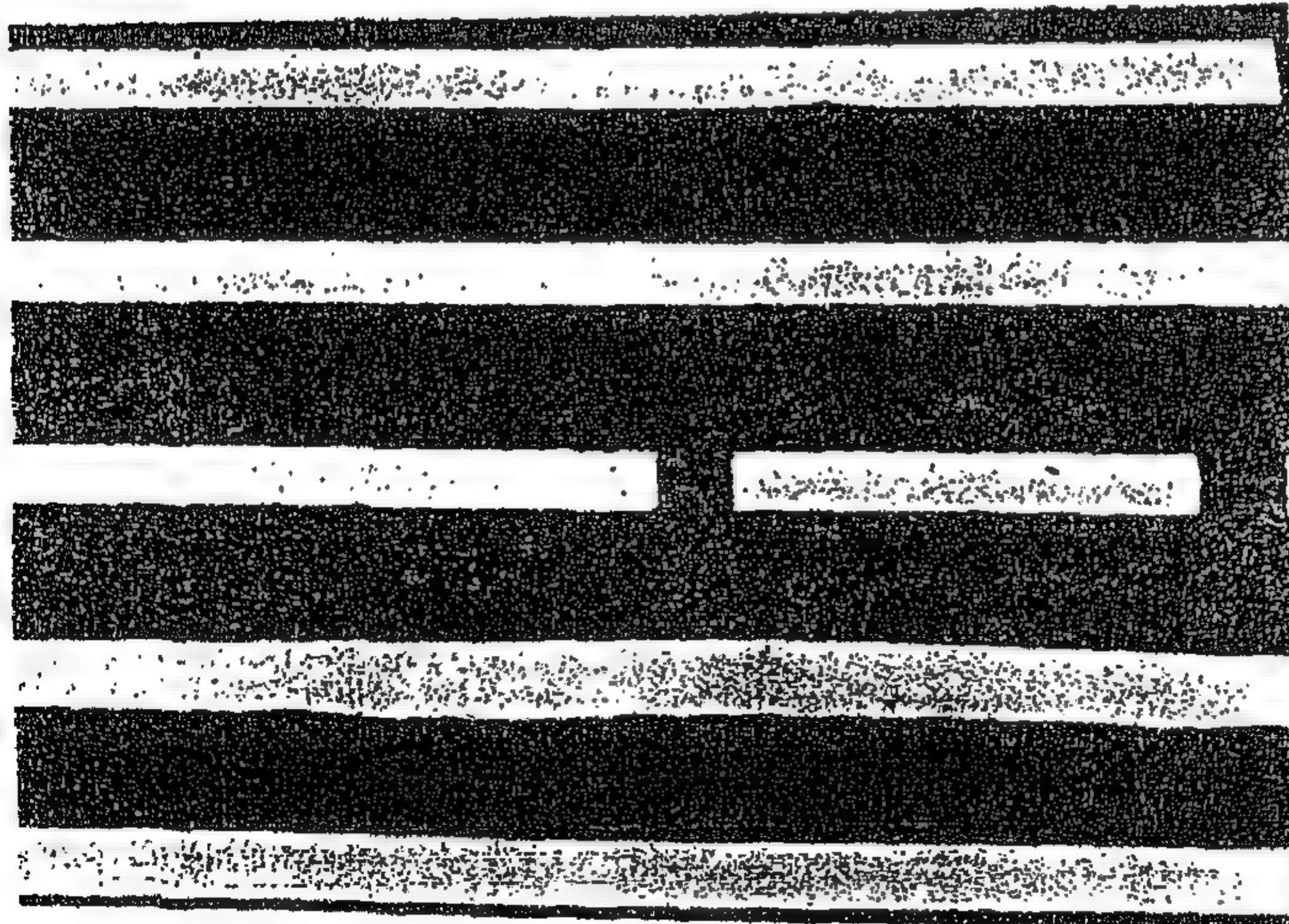
هناك العديد من التطبيقات مفصلة في التقرير التقني الخاص ASTM STP 586 حيث يؤكد اهمية وقيمة الفحص الشعاعي بالنيوترونات. فهذه التقنية تستخدم ، على سبيل المثال في فحص المعدات الحربية والمتفجرات و الأجزاء النووية ، كما في شكل 1-32 ، إضافة الى بعض أجزاء معدات الفضاء. وكذلك تستخدم للتأكد من وجود او عدم وجود او لتصحيح أماكن العبوات المتفجرة إضافة الى المواد اللاصقة والحلقات المطاطية (O-Rings). المستعملة في أجهزة التفريغ ومركبات الدائن وما شابه ذلك من مواد. يمكن فحص الوقود النووي ومواد السيطرة لتعيين توزيع النظائر فيها وللكشف عن المواد الغريبة وعدم كمال المادة. كما يمكن ملاحظة الترسبات الهيدراتية المترسبة على المعادن او انتشار البورون في المواد المركبة من الياف البورون والمعالجة حرارياً.

→ امتصاص أو عتمة الأشعة السينية العتمة للنيوترونات (امتصاص النيوترونات) ←



الشكل (31-1)

العتمة النسبية للنيوترونات الحرارية مقارنة مع الأشعة السينية المتولدة عند 125kV لبعض المواد الصناعية .



الشكل (32-1)

شاعية بالنيوترونات الحرارية لخمسة قضبان من الوقود النووي، أخذت للتأكد من حدوث تغييرات في الأبعاد خلال تشعيعها تمت الصورة باستخدام طريقة شاشة نقل الديسبروزيوم.

٥-٤-١ الفحص بطريقة التيارات الدوامة:

يعتمد الفحص بالتيارات الدوامة على قواعد الحث الكهرومغناطيسي وهي انه إذا قطع جسم موصل خطوط المجال المغناطيسي والعكس صحيح اي إذا قطعت خطوط المجال المغناطيسي الجسم الموصل فسيولد به تيار كهربائي.

يستخدم هذا الفحص للتعرف او التفريق بين مختلف الحالات الفيزيائية و الكيماوية والميتالورجية للمواد الموصلة كهربائياً سواء كانت مغناطيسية ام غير مغناطيسية، وبناءً على ذلك يمكن استخدام هذه التقنية للأغراض التالية:

١- قياس او التعرف على بعض ظروف وخواص المادة كالتوصيلية الكهربائية والمنفذية المغناطيسية والحجم الحبيبي ونوع المعاملة الحرارية والصلادة، والأبعاد الفيزيائية.

٢- للكشف عن الطيات والثنيات والشقوق والفجوات والاكتنافات.

٣- للتفريق او عزل المعادن غير المتشابهة والكشف عن الفروقات في تكوينها الكيماوي وبنيتها الدقيقة والخواص الأخرى.

٤- لقياس سمك طبقة الطلاء للمواد غير الموصلة على المواد الموصلة أو سمك طبقة المعادن غير المغناطيسية على أساس من معدن مغناطيسي.

بما أن الفحص بالتيارات الدوامة هو تقنية حث كهرومغناطيسي أساساً، فهي لا تتطلب الإتصال المباشر بين المجس (الملف الخاص) والقطعة المراد فحصها. وتمتاز طريقة الفحص هذه بسرعة الإجراء، وحيث أنها طريقة فحص لا إتلافي، فيمكن اذن فحص كامل المنتج الصناعي وبسرعة إذا تطلب الأمر ذلك.

تمتلك تقنية التيارات الدوامة مزايا ومجوديات، فتأثرها بعدد كبير من العوامل كالخواص الفيزيائية والبنوية والكيماوية يعد من المحاسن والمساوي في آن واحد. فقد تحجب او تشوش الإشارة الصادرة عن بعض المتغيرات، غير المؤثرة على المادة او أدائها أو على الأقل غير المقصودة، الإشارة الصادرة من المتغيرات الحرجة والمطلوب كشفها وبالتالي قد يؤدي ذلك الى استنتاج خاطئ.

تتوفر الآن تجارياً العديد من أجهزة الفحص بالتيارات الدوامية . تستخدم بعض هذه الأجهزة للفحص الاستكشافي او لفحص الأجزاء البسيطة الشكل . لقد تم ايضاً تصميم أجهزة خاصة لاستخدامها للقطع المعدنية المنتجة من صفائح او قضبان او أنابيب .

أسس الفحص :

تتشابه طريقة الفحص بالتيارات الدوامية ، من أوجه كثيرة ، مع تقنية التسخين بالحث التي تستعمل لتسخين المعادن او تصليدها او مراجعتها . فكليةما يعتمد على الحث الكهرومغناطيسي لتوليد او حث التيارات الدوامية في الجزء الموضوع داخل او بالقرب من ملف واحد او أكثر . يسبب التغيير في التقارب بين الملفات الحادثة والأجزاء المراد فحصها وكذلك التغيير في الخواص الكهربائية للجزء ، تغيرات في التحميل الكهربائي والرنين للمولد .

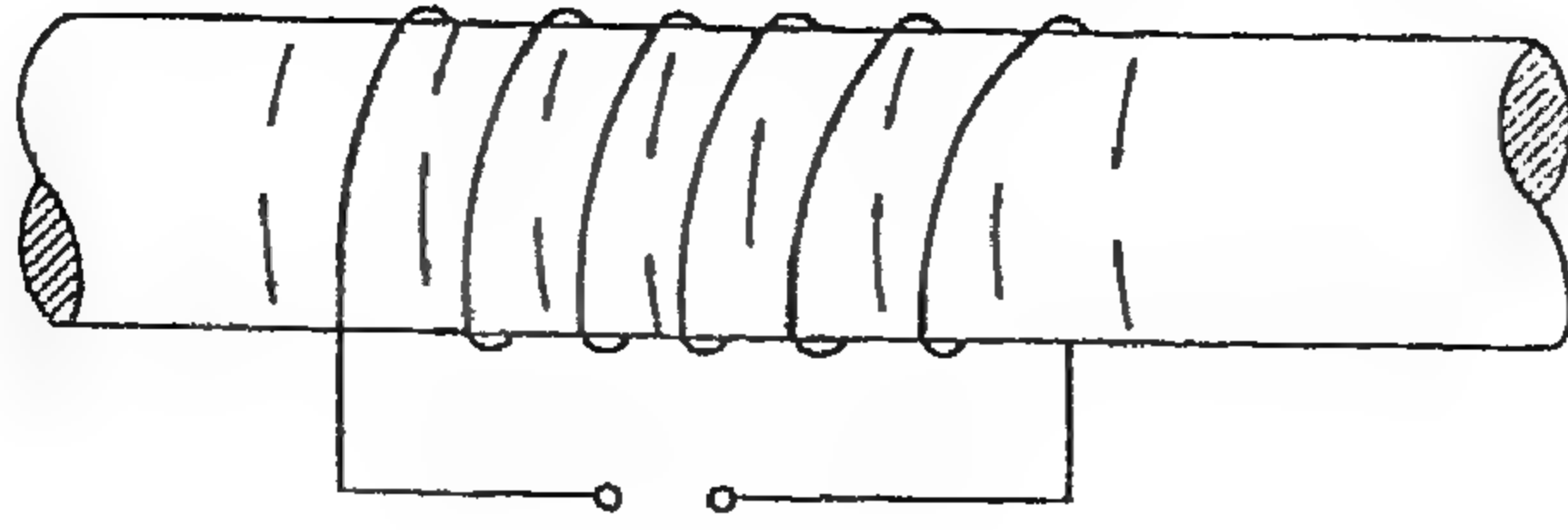
تعمل أنظمة التسخين بالحث عند قدرة عالية في حين أن أنظمة الفحص بالتيارات الدوامية تعمل عند قدرة واطئة جداً ، بالمقارنة ، وذلك للتقليل من مستوى التسخين الناتج . تتم مراقبة التغيير في التحميل الكهربائي ، في حالة أنظمة التيارات الدوامية ، الناتج من التغيير في الأبعاد بواسطة دوائر الكترونية خاصة .

يتأثر مقدار العمق المراد فحصه في الجزء بمقدار التردد المستخدم لأن شدة التيارات الدوامية تكون على أوجها عند السطح وتتدرج في الإنخفاض كلما ابتعدنا عن السطح الى داخل الجزء حتى تصل قيمتها الى الصفر عند مسافة معينة وهذا ما يسمى بالظاهرة السطحية (skin effect) .

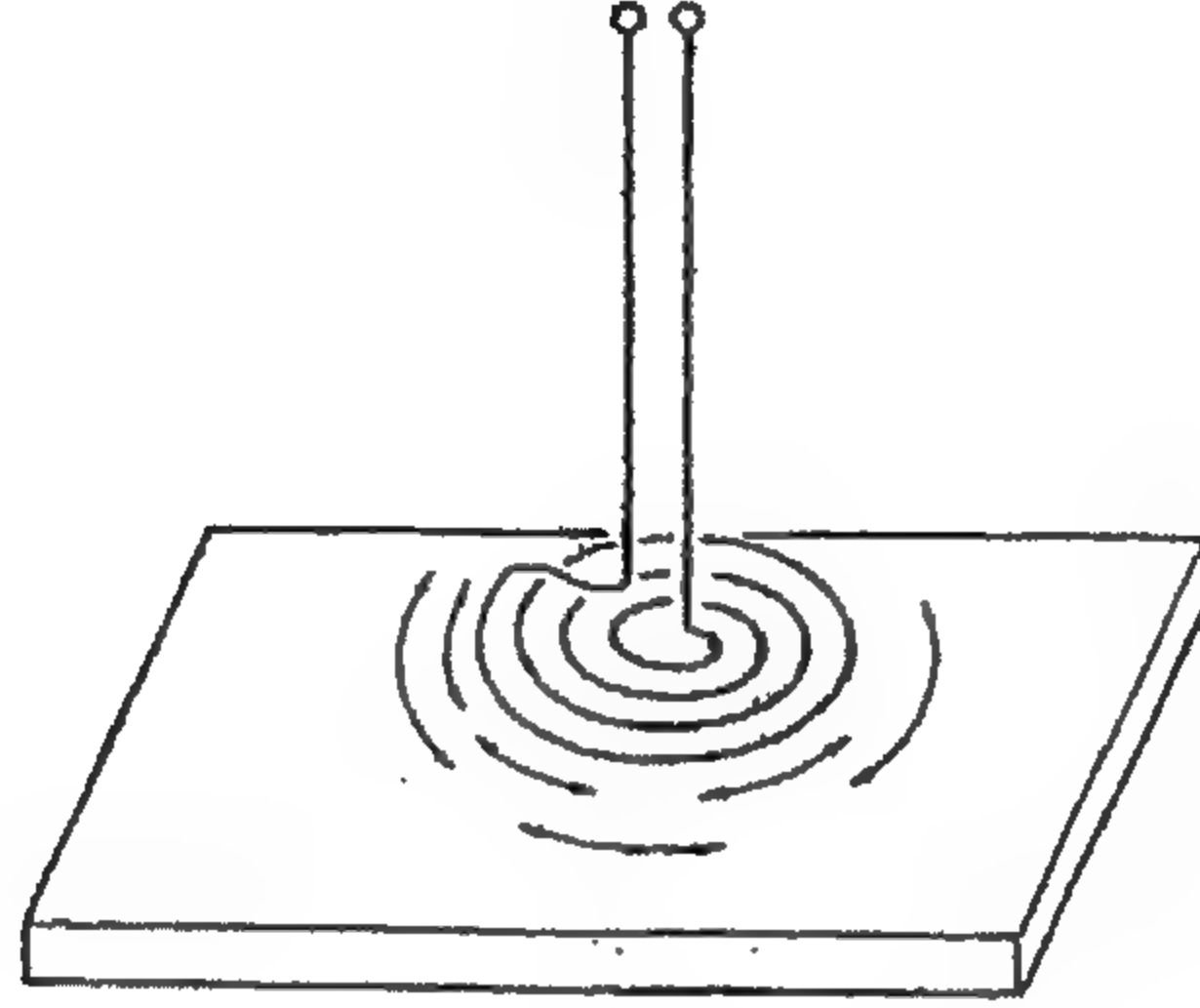
يختلف تصميم الملفات المستخدمة في التسخين بالحث عن تلك المستخدمة في الفحص بالتيارات الدوامية .

وظائف نظام الفحص الأساسية :

يوضع الجزء المراد فحصه في داخل او بالقرب من ملف يمر فيه تيار متناوب كما مبين في الشكل (1-33) . يدعى التيار المتناوب هذا بالتيار المهيج (exciting current) ، والذي يؤدي الى تكوين التيارات الدوامية في الجزء كنتيجة للحث



(a)



(b)

الشكل 33-1

(a) ملف لولبي حول قضيب يولد تيارات دوامة محيطية
(b) ملف حلزوني مسطح، يولد تيارات دوامة دائرية في لوح معدني مسطح.

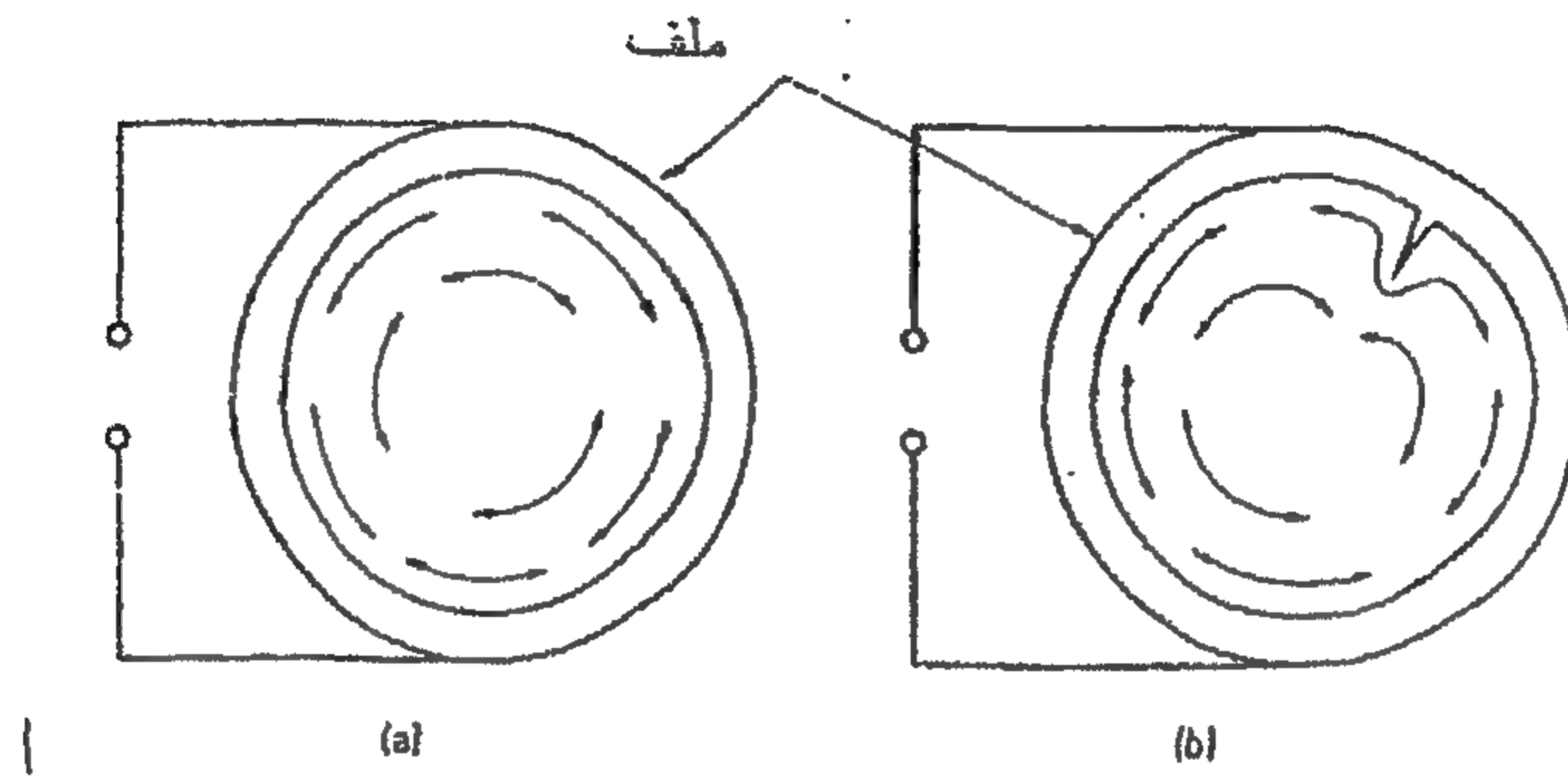
الكهرومغناطيسي. يكون مسار هذه التيارات في الجزء على شكل دوائر مغلقة ويعتمد مقدارها وطورها على:

أ- المجال الكهرومغناطيسي الأساسي المتكون من مرور التيار المهيج في الملف.

ب- الخواص الكهربائية للجزء المراد فحصه.

ج- المجال الكهرومغناطيسي المتولد نتيجة لمرور التيارات الدوامة في الجزء. يعتمد مقدار المجال الكهرومغناطيسي في الجزء وحوله على كل من التيار المهيج المار في الملف والتيارات الدوامة المارة في الجزء. وتعتمد التيارات الدوامة المارة بالجزء بدورها على الخواص الكهربائية لمادة الجزء ووجود أو عدم وجود عيوب أو تقطعات في الجزء وأخيراً على المجال الكهرومغناطيسي المتولد في الجزء.

يبين الشكل (34-1) التغيير الحاصل في مسارات مرور التيارات الدوامة الناتج بسبب وجود شق في قضيب ، والقضيب هنا في داخل ملف الفحص أي أن محوريهما متوازيين. لا يوجد أي عيب في المقطع (a) لذلك يلاحظ التناظر في مسارات التيارات الدوامة، في حين أن هناك شق في المقطع (b) لذا يعاق جريان التيارات الدوامة ومن ثم يتغير اتجاهها ، حيث يؤدي ذلك إلى تغييرات واضحة في المجال الكهرومغناطيسي المصاحب لها.



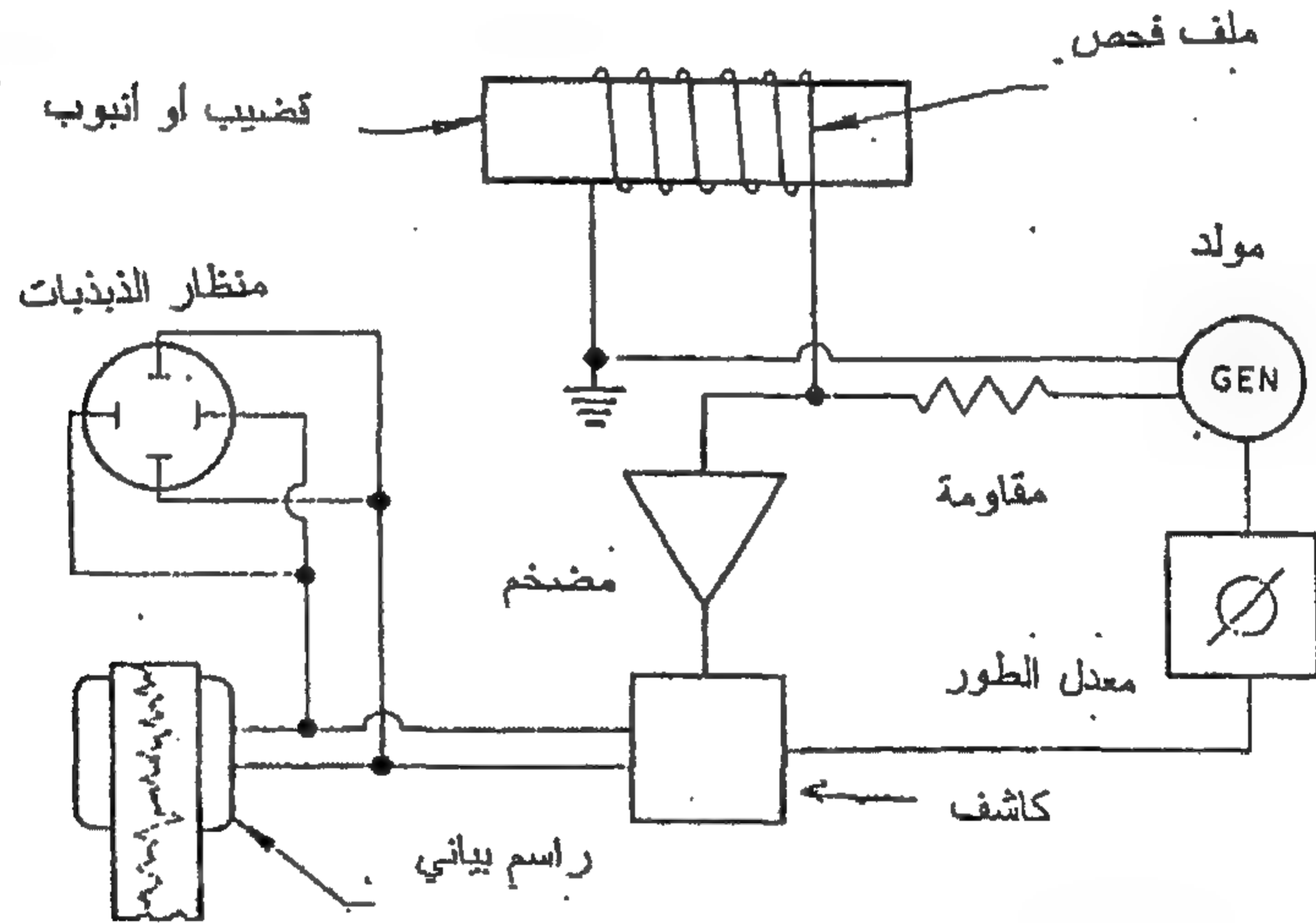
الشكل (34-1)

مقطع عرضي للقضيب مع الملف اللولبي، تلاحظ نمط التيارات الدوامة (a) مقطع خالي من العيب ، تلاحظ تيارات دوامة منتظمة (b) نمط التيارات الدوامة المشوه بسبب وجود عيب.

ومما تقدم يتضح أنه يمكن مراقبة حالة الجزء بملاحظة تأثير المجال الناتج على الخواص الكهربائية للملف المثبت مثل الممانعة الكهربائية $impedance$ والفولتية المحتثة أو التيارات المحتثة. ويمكن أيضاً مراقبة تأثير المجال الكهرومغناطيسي بملاحظة الفولتية المحتثة في واحد أو أكثر من الملفات الأخرى الموضوعة داخل المجال بالقرب من الجزء المراد فحصه.

تتباين أنظمة التيارات الدوامة في التعقيد اعتماداً على متطلبات الفحص كل على انفراد إلا أنه يجب تزويد معظم الأنظمة ببعض الأجهزة بحيث يمكن عمل مايلي:

- ١- تهيج ملف الفحص.
 - ٢- تغيير الإشارة الخارجة للملف الفحص بواسطة الجزء المراد فحصه.
 - ٣- معالجة إشارة ملف الفحص قبل تضخيمها.
 - ٤- تضخيم إشارة ملف الفحص.
 - ٥- تحسس إشارة ملف الفحص وعادةً ما يصاحب ذلك بعض التحليل أو التمييز للإشارات.
 - ٦- عرض الإشارات على مقياس أو منظار الذبذبات (oscilloscope) أو راسم الذبذبات أو راسم بياني أو تسجيل الإشارات على الأقراص المرنة أو الأقراص المدمجة الخاصة بالحاسوب.
 - ٧- مداولة الجزء المراد فحصه وتثبيت مجموعة ملف الفحص.
- نلاحظ العناصر الأساسية لنظام الفحص في الرسم التخطيطي (شكل 35-1).
 طوّرت الأجهزة الملاحظة في الشكل (35-1) لتلائم فحص القضبان أو الأنابيب .



الشكل (35-1)

رسم تخطيطي يبين العناصر الأساسية لنظام الفحص بالتيارات الدوامة.

يزود المواد ملف الفحص بالتيار المهيج ويزامن الإشارة الى مغير الطور والذي بدوره يزود الكاشف بإشارات التبديل. يتغير المجال الكهرومغناطيسي للملف نتيجة لتحميل ملف الفحص بالجزء المراد فحصه.

تتم تغذية الإشارة الخارجة من ملف الفحص الى جهاز التضخيم ويتم كشفها او تعديلها بالكاشف ، ثم تعرض على شاشة عرض منظار الذبذبات (oscillo-scope) او تُرسم بالراسم البياني أو أية وسيلة أخرى.

تتأثر عملية الفحص بالتيارات الدوامة بالمتغيرات الأساسية التالية:

١- ممانعة الملف.

٢- التوصيليه الكهربائية للجزء المراد فحصه.

٣- المنفذية المغناطيسية.

٤- عوامل التباعد والملء.

٥- الظاهرة السطحية.

٦- تأثير الحافة.

ممانعة الملف coil impedance :

يصل المجال المغناطيسي للملف الى مستوى ثابت عندما يمر تيار مباشر فيه وتكون المقاومة الكهربائية للسلك هي المحدد الوحيد لمرور التيار. أما عندما يمر تيار متناوب في الملف فهناك عاملان للتحديد (للإعاقة) هما مقاومة السلك للتيار المتناوب والمفاعلة الحثية (inductive reactance) (X_L). تكون قيمة المقاومة الكهربائية للتيار المتناوب في الملفات المعزولة (الفارغة القلب) والتي تعمل عند ترددات واطئة او أن قطر سلكها صغير، مقاربة جداً لقيمة مقاومة التيار المباشر لسلك الملف.

تزداد نسبة قيمة مقاومة التيار المتناوب الى قيمة مقاومة التيار المباشر بزيادة

التردد او قطر سلك الملف. تهمل مقاومة سلك الملف غالباً، عند مناقشة أسس التيارات المحتثة، لأنها ثابتة تقريباً. لكنها تتغير بصورة ملحوظة مع درجة حرارة السلك والتردد وتوزيع المجال المغناطيسي الناتج عن الملف.

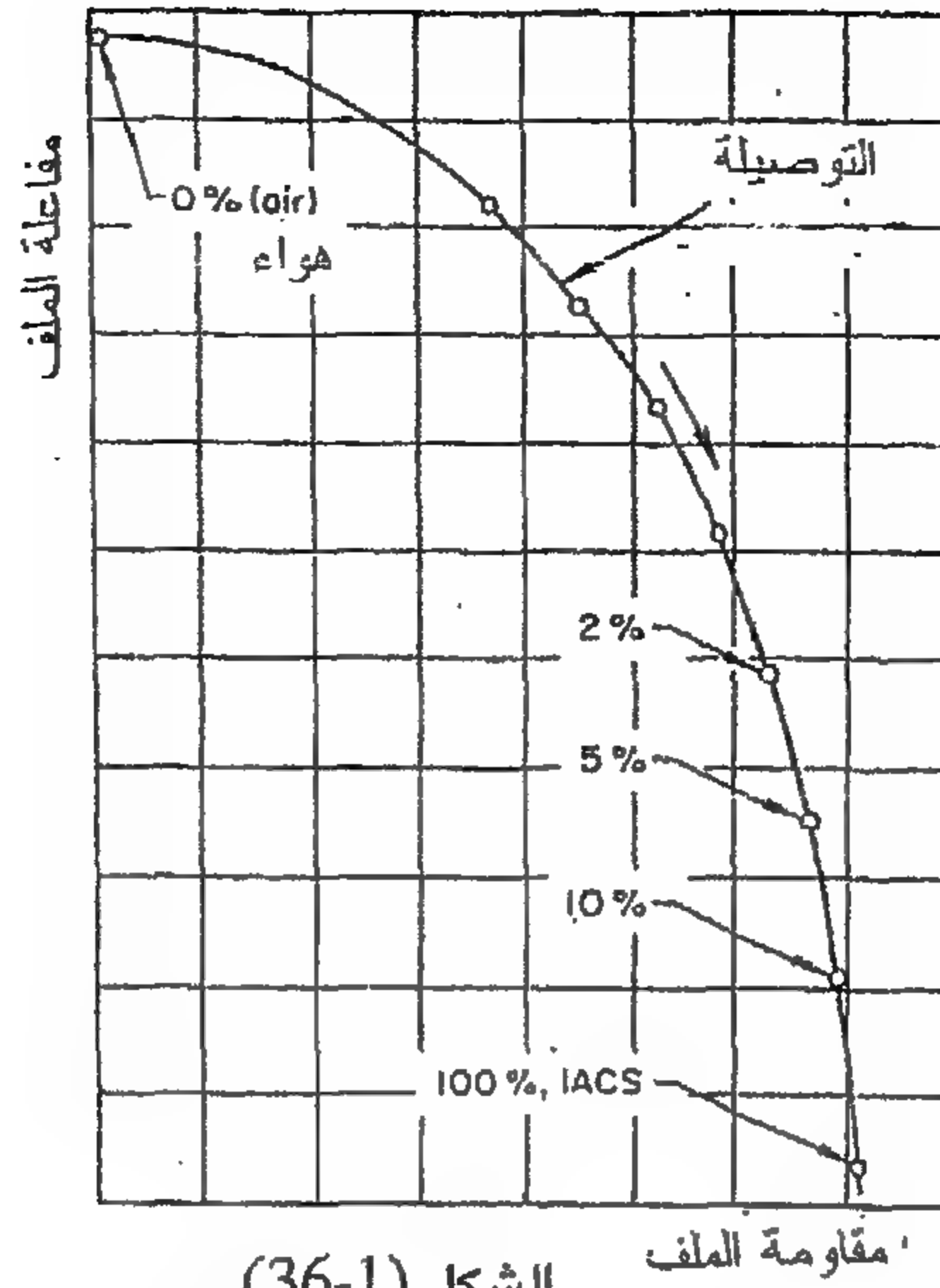
يتحد تأثير المفاعلة الحثية للمحاثّة (inductance) والتردد ويتم التعبير عنها بالأوم. تسمى مجموع المقاومة للتيار المتناوب في اي ملف بالمانعة "Z" "impedance" وتتضمن كلاً من مقاومة التيار المتناوب "R" والمانعة الحثية (X_L).

عندما توضع قطعة معدنية بالقرب او في داخل ملف الفحص، يتغير المجال الكهرومغناطيسي الناتج من الملف نتيجة لجريان تيار محث في القطعة المراد فحصها. وبهذا تتأثر، بشكل عام، كل من مقاومة التيار المتناوب والمفاعلة الحثية للملف. وتتألف مقاومة الملف المحمل من مركبتين هي على وجه التحديد مقاومة أسلاك الملف للتيار المتناوب والمقاومة الظاهرية او المزدوجة الناتجة عن وجود القطعة المفحوصة. تنعكس ظروف القطعة المفحوصة (وجود العيوب او عدمه على سبيل المثال) على التغييرات في هاتين المركبتين.

ترسم الممانعة عادةً على مخطط مستوى الممانعة. فترسم المقاومة في هذا المخطط على أحد الإحداثيات وترسم المفاعلة الحثية (المحاثّة) على الآخر. وحيث ان كل ظرف معين للمادة المراد فحصها يمكن أن ينتج عنه ممانعة ملف معينه، فيكون كل ظرف مطابق لنقطة معينة على مخطط مستوى الممانعة. فعلى سبيل المثال، إذا وضع الملف على قطع معدنية ذات أسماك مختلفة متدرجة كل لها مقاومة (p) مختلفة، فكل قطعة سوف تسبب ممانعة مختلفة في الملف وسوف تتبع لنقط مختلفة على المحل الهندسي لمستوى الممانعة، يشبه المنحنى المتكون، المنحنى الموجود في الشكل (1-36)، والذي يعتمد أساساً على تصنيف I A C S (International Annealed Copper Standard) للتوصيلية. يمكن توليد منحنيات أخرى اعتماداً على متغيرات أخرى للمادة كسمك المقطع ونوع العيوب السطحية.

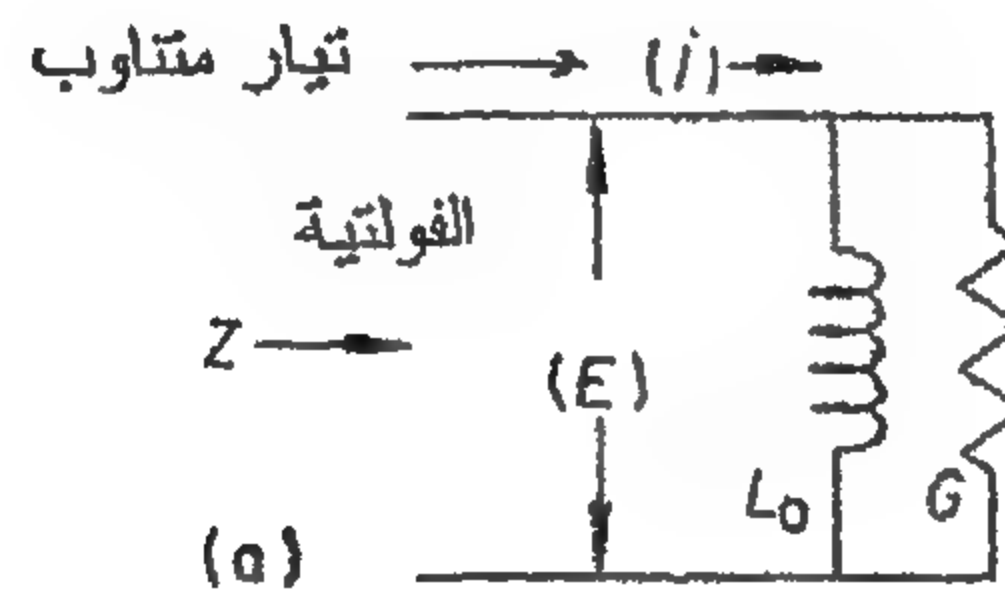
مركبات الممانعة:

يبين الشكل (1-37) دائرة مكافئة بسيطة لملف فحص والجزء المراد فحصه.



الشكل (36-1)

رسم مستوى للممانعة النموذجية المستخرجة بواسطة وضع ملف فحص بالقتاب على سلسلة من القطع السميكة، لمعادن، كل واحدة، لها قيمة مختلفة من المقاومة الكهربائية أو التوصيلية حسب IACS. كان تردد التيار المار بملف الفحص 100kHz.

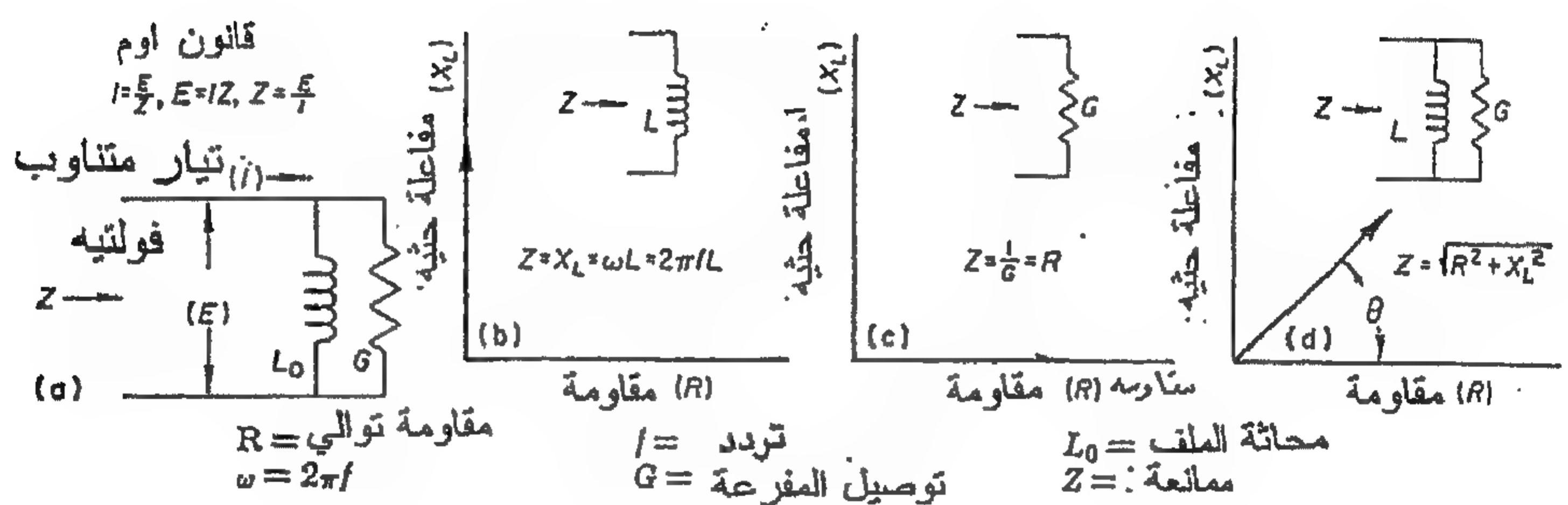


قانون أوم $Z = \frac{E}{I}$ و $E = IZ$ و $I = \frac{E}{Z}$

الشكل (37-1)

دائرة مكافئة بسيطة لملف فحص والجزء تحت الفحص.

يفترض ان للملف محاثية هي L_0 ومقاومة قليلة يمكن إهمالها. يتألف الجزء المراد فحصه من أنبوب خفيف الجدران له توصيل مفرعه G (shunt conductance) موضوع قريباً من الملف. عندما يمر تيار متناوب في الدائرة تحت ظروف الحالة المستقرة، فسوف يخزن قسم من الطاقة في الدائرة وتعود الى المولد في كل دوره والقسم الآخر منها سيضمحل او يفقد على شكل حرارة في كل دورة. فالمفاعلة الحثية X_L ، مركبة الممانعة " Z "، للدائرة الكهربائية تتناسب مع الطاقة المخزونة بالدوره الواحدة اما المقاومة R ، مركبة الممانعة، فتتناسب مع الطاقة المضمحلة في الدورة الواحدة. تساوي الممانعة " Z " نسبة معقدة من الفولتية المسلطة (E) مقسومة على التيار وحسب قانون اوم.



الشكل 38-1

(d,c,b) مخططات الممانعة لثلاث حالات للدائرة المكافئة في (a) اي الشكل 37-1.

يستعمل اصطلاح معقدة ليشير، بشكل عام، الى أن التيار المتناوب والفولتية ليستا بنفس زاوية الطور.

يبين الشكل (1-38) ثلاثة مخططات ممانعة لدائرة مكافئة لتلك التي في الشكل (1-37) ولثلاث ظروف . تكون الدائرة عند وجود الملف مفاعله فقط، كما في (1-38b)، أي أن :

$$Z = X_L = \omega L = 2 \pi f L \quad \dots\dots\dots(1-7)$$

حيث تمثل L المحاثة الذاتية و f التردد.

أما عند وجود التوصيل (conductance) لمكافئ الدائرة (وهي الحالة الافتراضية للوجود الفعلي للملف الفحص والجزء المراد فحصه) فالممانعة تولد مقاومة نقيه أي أن $Z = \frac{1}{G} = R$ ، كما في الشكل (1-38c). أما عند ربط كلاً من الملف والتوصيل فالممانعة لها مركبتين أحدهما للمفاعلة والأخرى للمقاومة بشكل عام وعندها تكون $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ كما في الشكل (1-38d) تكون R المقاومة على التوالي، X_L المفاعلة.

على التوالي. تشترك الزاوية θ مع الممانعة وهذه الزاوية دالة للنسبة بين مركبتي الممانعة R و X_L . وتظهر قيمة الزاوية θ في الشكل (1-38d) مساوية للزاوية 45 تقريباً.

يمكن أن تبين النقاط والمحال الهندسية على مخططات مستوى الممانعة باستخدام التمثيل الطوري وذلك للعلاقة الوثيقة بين مخططات الممانعة والمخططات الطورية حيث أن فولتية الإشارة تتناسب تناسباً مباشراً مع الممانعة عند ثبوت التيار.

التوصيلية الكهربائية:

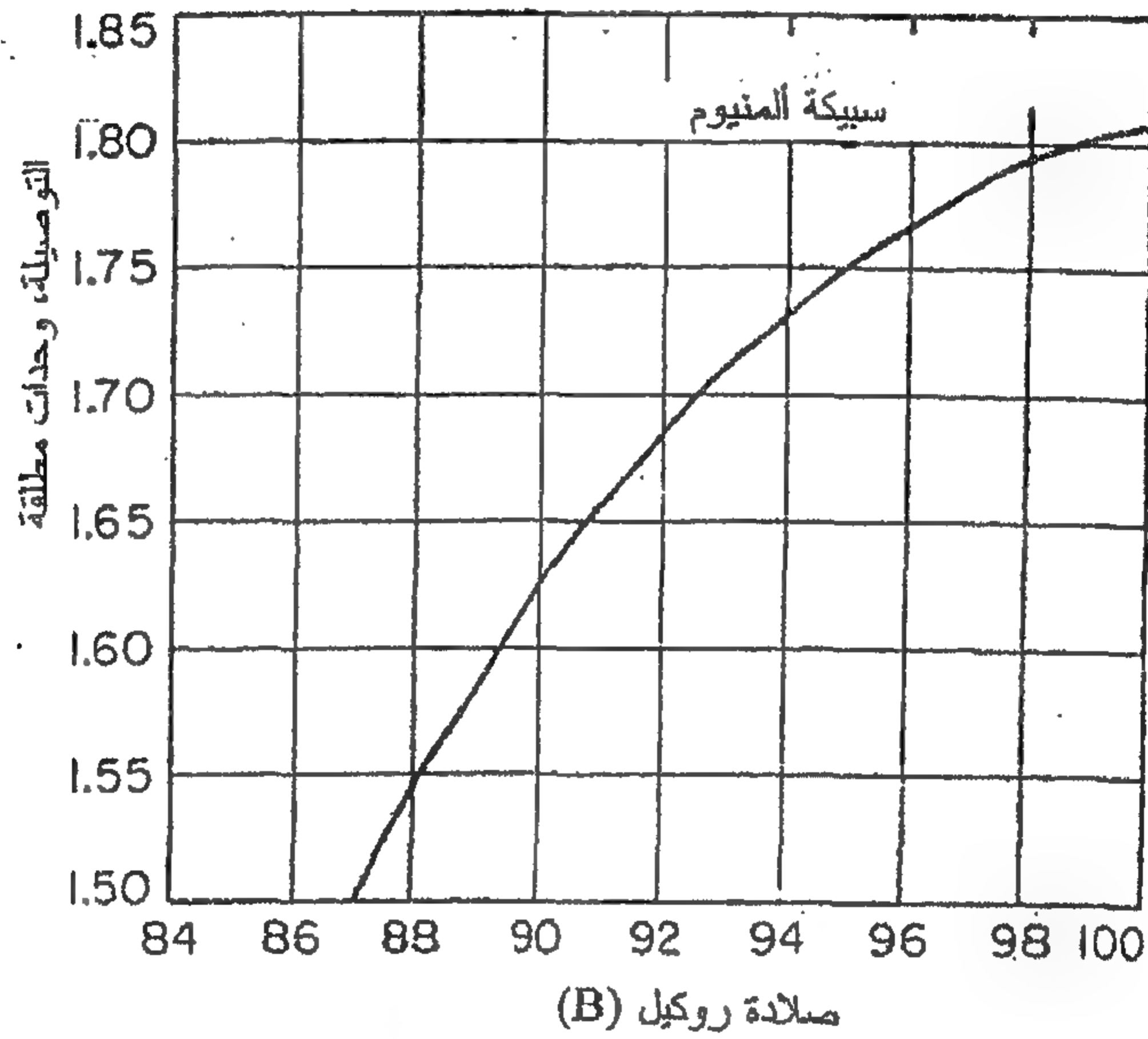
لجميع المواد مقاومة مميزة لمرور التيار الكهربائي. تصنف المواد التي لها مقاومة عالية جداً على أنها عوازل ، أما المواد ذات المقاومة المتوسطة فتصنف على أنها شبه موصلة، في حين تصنف المواد التي لها مقاومة (p) قليلة على أنها مواد موصلة. تكون المواد الموصلة، التي تتضمن أغلب المعادن، ذات أهمية كبيرة في فحص التيارات الدوامه. تتغير التوصيلية النسبية لعامة المعادن والسبائك على مدى واسع جداً.

يمكن ان تقاس قابلية المواد لتوصيل التيار بدلالة التوصيلية او المقاومة تكون القياسات في الفحص بالتيارات الدوامة تعتمد في الغالب على النحاس القياسي العالمي الملدن (IACS). تم جعل التوصيلية النسبية للنحاس النقي الملدن في هذا النظام هي 100% ، ويُعبر عن توصيلية بقية المعادن بالنسبة المئوية لهذه القيمة القياسية. فعلى سبيل المثال تصنف توصيلية الألمنيوم النقي على أنها 61% IACS أو 61% من تلك التي للنحاس النقي. أن قيم المقاومة وتصنيف التوصيلية لبعض المعادن والسبائك الشائعة مدرجة في الجدول (13-1).

جدول (13-1) قيم المقاومة والتوصيلية لبعض المعادن والسبائك الشائعة.

المعدن او السبيكة	المقاومية أوم.سم $\times 10^{-6}$	التوصيلية % IACS
الفضة	1.63	105
النحاس الملدن	1.72	100
الذهب	2.44	70
الألمنيوم	2.82	61
سبائك الألمنيوم		
6061-T6	4.1	42
7075-T6	5.3	32
2024-T4	5.2	30
المغنيسيوم	4.6	37
النحاس الأصفر (70-30)	6.2	28
برونزيات الفوسفور	16	11
سبيكة المونيل (Monel)	48.2	3.6
الزركونيوم	50	3.4
زرك الوي-2 (Zircaloy-2)	72	2.4
التيتانيوم	54.8	3.1
سبيكة Ti-6Al-4V	172	1.0
الفولاذ المقاوم للصدأ 304	70	2.5
انكونيل 600 (Inconel 600)	98	1.7
هاستيلوي X (Hastelloy X)	115	1.5
واسبالوي (waspaloy)	123	1.4

تؤثر عوامل عديدة على توصيلية المعدن وبالأخص درجة الحرارة والتكوين الكيماوي والمعاملة الحرارية وما ينتج من بنية مجهرية والحجم الحبيبي والصلادة والاجهادات المتخلفة. والعكس صحيح حيث يمكن استخدام التيارات الدوامة لاختبار التكوين الكيماوي ومختلف الصفات الميتالورجية بشرط ان تأثيرها على التوصيلية كافٍ للتزويد بالتباين الضروري للفحص . فعلى سبيل المثال يمكن اختبار المعاملة الحرارية لسبائك الألمنيوم القابلة للتصليد بالتعتيق بسبب التأثير الواضح للصلادة على التوصيلية (الشكل 1-39) .



الشكل (1-39)

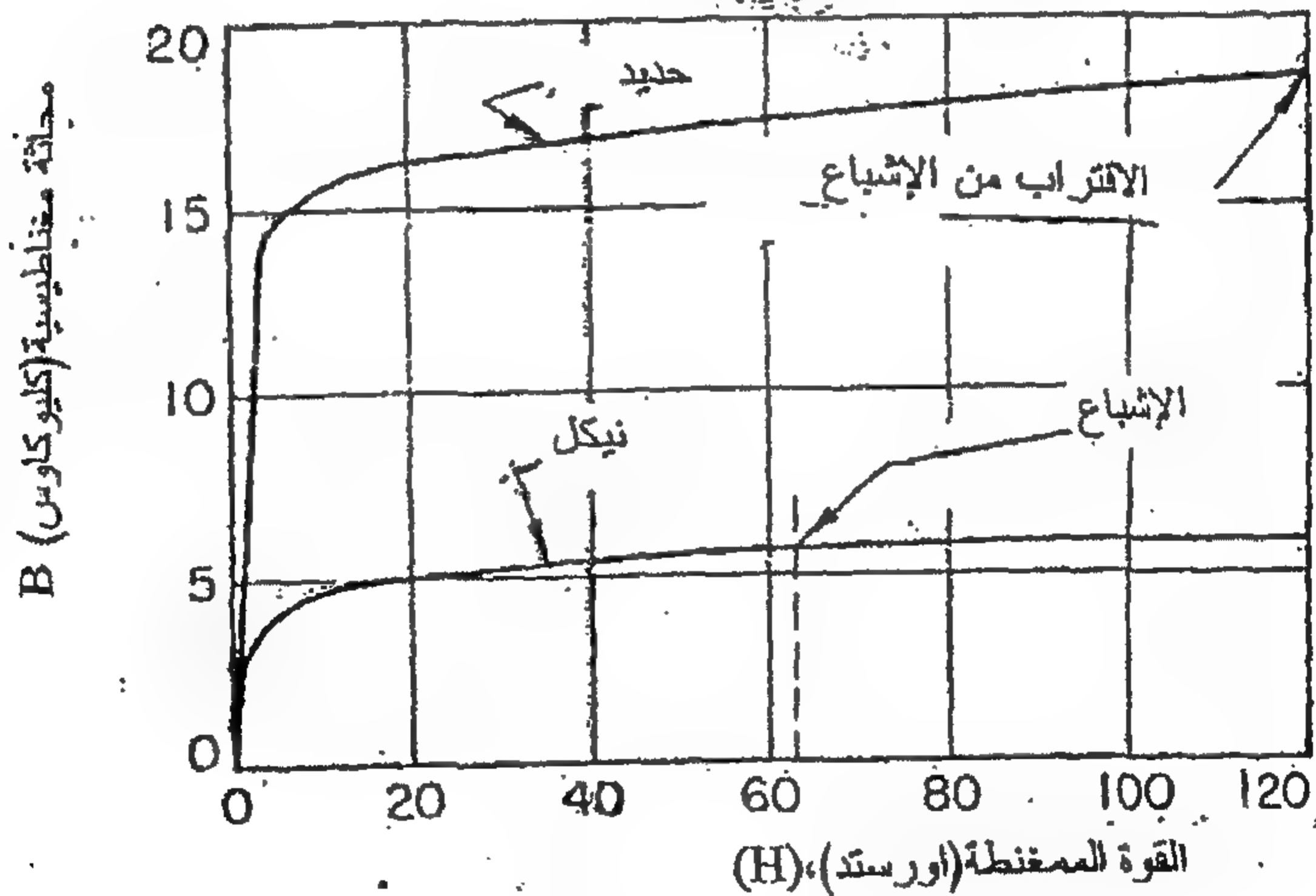
العلاقة بين الصلادة والتوصيلية الكهربائية لسبيكة من الألمنيوم قابلة للتعامل الحراري والتي تسمح للتيارات الدوامة بمراقبة المعاملة الحرارية لها.

المنفذية المغناطيسية:

تعمل المعادن المغناطيسية (القابلة للتمغنط) وسبائكها، ومنها الحديد والنيكل والكوبلت وبعض سبائكها، على تركيز فيض المجال المغناطيسي فهي تنجذب بقوة

نحو المغناطيس ولها قابلية على التمغنط عالية جداً وهي متغيرة كما أن لها منفذيات عالية جداً ومتغيرة أيضاً.

ان المنفذية المغناطيسية ليست مقداراً ثابتاً للمادة الواحدة بل تعتمد على شدة المجال المغناطيسي المؤثر عليها. فإذا تأملنا على سبيل المثال، نموذج من الفولاذ أزيلت مغناطيسيته تماماً ثم وضع داخل ملف حلزوني. فكلما يزداد التيار المار في الملف فالمجال المغناطيسي المتكون من هذا التيار يزداد أيضاً. فيزداد الفيض المغناطيسي في الفولاذ بسرعة في البداية ثم ينخفض معدل الزيادة بحيث أن الزيادة الإضافية الكبيرة في شدة المجال المغناطيسي ستولد زيادة صغيرة في الفيض داخل الفولاذ. فعندئذ يقال ان الفولاذ قد وصل الى ظروف التشبع المغناطيسي. يعرف المنحنى الذي يبين العلاقة بين شدة المجال المغناطيسي والفيض المغناطيسي داخل الفولاذ بمنحنى التمغنط يبين الشكل (1-40) منحني التمغنط للفولاذ والنيكل الملدنيين والنقيين نقاوة تجارية. فالمنفذية المغناطيسية للمادة هي النسبة بين شدة المجال المغناطيسي ومقدار الفيض المغناطيسي في المادة. وكما يبدو من الشكل (1-40) تكون المنفذية المغناطيسية عند منطقة التشبع (أي عندما لا يكون هناك زيادة يعتد بها في الفيض المحث في المادة عند تغيير شدة المجال) ثابتة تقريباً مع التغيرات الصغيرة في شدة المجال.



الشكل (1-40)

منحني التمغنط للحديد والنيكل النقيين نقاوة تجارية والملدنيين

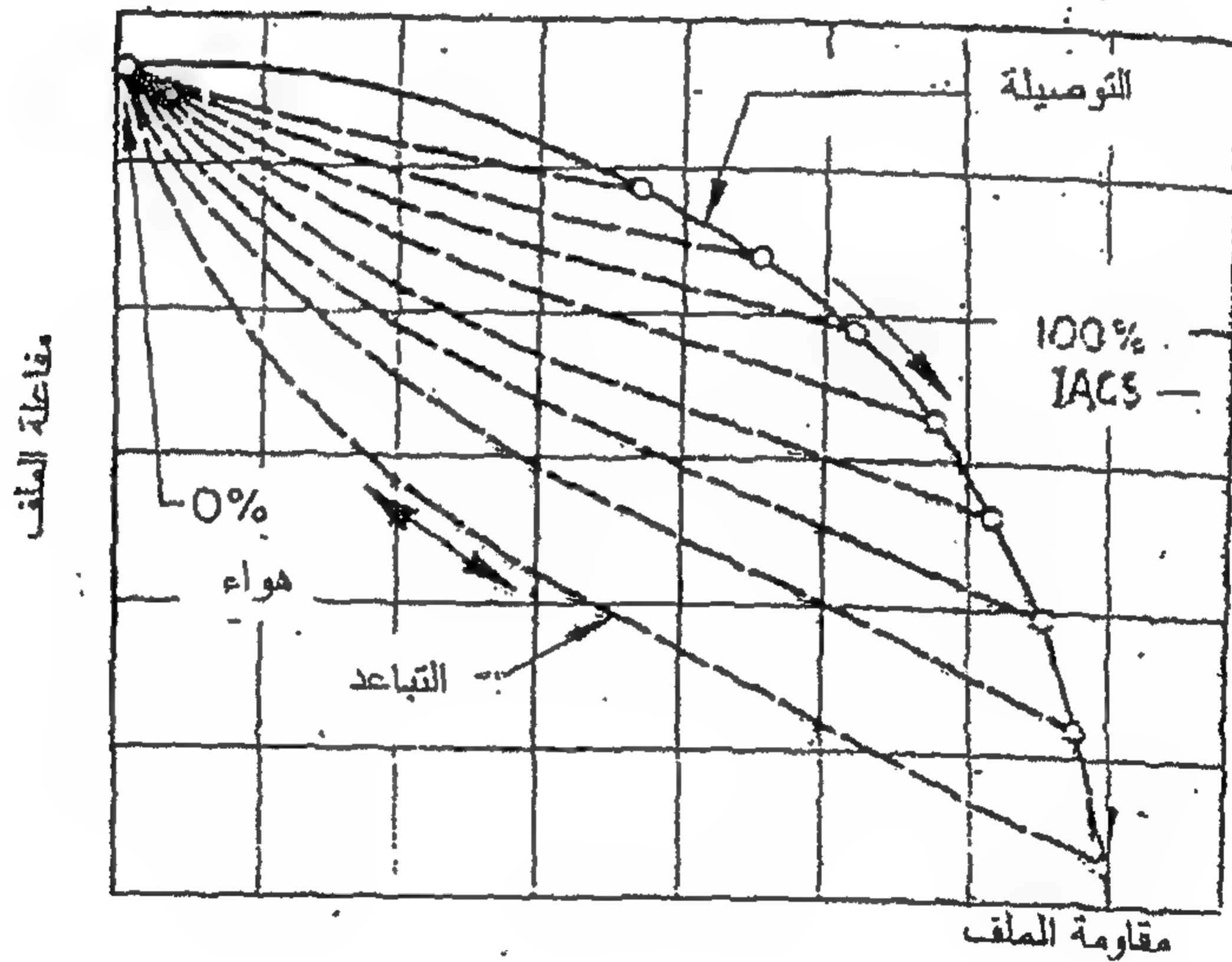
تؤثر المنفذية المغناطيسية، للمادة المراد فحصها، بشدة على استجابة التيارات الدوامة، لأن التيارات الدوامة يتم حثها بواسطة مجال مغناطيسي متغير. ولهذا السبب فإن التقنية والظروف المستخدمة في فحص المواد المغناطيسية تختلف عن تلك المستخدمة لفحص المواد غير المغناطيسية. مع ان نفس العوامل التي تؤثر على التوصيلية الكهربائية للمادة (كالتكوين الكيماوي والصلادة والاجهادات المتخلقة والعيوب البلورية) يمكن أن تؤثر أيضاً على المنفذية المغناطيسية. لذلك يمكن استخدام تقنية التيارات الدوامة لفحص كل من المواد المغناطيسية وغير المغناطيسية، ومع ان المواد الموصلة المغناطيسية لها توصيلية كهربائية ايضاً وتتغير مع تغير ظروف المادة، فإن تغييرات المنفذية بشكل عام لها تأثير أكبر بكثير على استجابة التيارات الدوامة من متغيرات التوصيلية عند ترددات الفحص الواطئة.

يمكن استخدام ظاهرة ثبوت المنفذية المغناطيسية للمواد المغناطيسية في حالة التشبع للسماح بفحص المواد المغناطيسية بتقنية التيارات الدوامة مع انخفاض شديد لتأثير التغييرات في المنفذية المغناطيسية. فيوضع الجزء المراد فحصه داخل الملف الذي يمر به تيار مباشر، حيث يجب أن يكون مقدار التيار المستخدم كافياً لتحقيق التشبع المغناطيسي للجزء. يوضع ملف الفحص داخل الملف المولد للمجال المغناطيسي المشبع وقريباً جداً من الجزء المراد فحصه. تستخدم هذه التقنية بصورة عامة عند فحص التقطعات في المواد المغناطيسية، لأن التغيير الطفيف في المنفذية ليس بذي شأن وربما يؤدي الى رفض المادة المقبولة.

عامل التباعد:

عند تزويد مجس ملف الفحص، المربوط بجهاز الفحص الملائم، بالطاقة في الهواء، فسيعطي إشارة حتى ولو لم يكن هناك مادة موصلة بالقرب منه. تبدأ هذه الإشارة بالتغيير كلما اقترب الملف من المادة الموصلة، وبما أن المجال المغناطيسي للملف يكون على أشده قريباً جداً من الملف فيستمر التغيير المشار اليه بالزيادة حتى يوضع الملف مباشرة على المادة الموصلة. تدعى التغييرات في الإشارة التي تحدث مع التغييرات في المسافة الفاصلة بين الملف والمادة الموصلة (الجزء تحت الفحص) بعامل التباعد (Lift-off factor).

ان تأثير التباعد من الوضوح بمكان بحيث ان أي تغيير في المسافة الفاصلة قد يحجب عدة إشارات ناتجة عن الظروف او الحالة التي يلزم البحث عنها. ولهذا يكون من الضروري المحافظة على علاقة ثابتة بين حجم وشكل الملف من جهة وحجم وشكل الجزء المراد فحصه. وتعود الصعوبة الشديدة في اداء الفحص الذي يتطلب مسح الجزء المعقد الشكل الى تأثير التباعد ايضاً. يمكن استنباط التغيير في ممانعة الملف مع التباعد من مخطط مستوى الممانعة المبين في الشكل (41-1). فعند تعليق الملف في الهواء بعيداً عن الجسم الموصل ، تكون الممانعة عند نقطة النهاية العليا للمنحنى عند اليسار الأقصى. وتتحرك الممانعة باتجاه الخطوط المتقطعة حتى يكون الملف على تماس مع الجسم الموصل. وعند حصول التماس تكون الممانعة عند نقطة متعلقة بممانعة الجزء المراد فحصه والتي تمثل في هذه الحالة التوصيلية .



الشكل 41-1

رسم مستوى الممانعة يبين منحنيات التوصيلية الكهربائية ومقدار التباعد (Lift-off). التردد عند الفحص 100k Hz

وبالرغم من ان ظاهرة التباعد قد تكون مزعجة في العديد من التطبيقات، إلا أنه يمكن الاستفادة منها أيضاً. على سبيل المثال، يمكن استغلال ظاهرة التباعد بصورة مثالية في أجهزة قياس سمك طلاء المواد العازلة كالأصباغ وطلاء الأنودة على المعادن.

عامل الملء:

يسمى عامل التباعد في حالة المقارنة مع الملف المحيط بالجزء المراد فحصه بعامل الملء. وهو عبارة عن مقياس لمدى ما يملأه الجزء المفحوص من ملف الفحص. وتحصل التغييرات في عامل الملء، كما هو الحال في عامل التباعد من بعض العوامل كالتغييرات في القطر الخارجي للجزء المراد فحصه لأن أي تغيير صغير يمكن أن يعطي إشارات كبيرة. تشبه منحنيات التباعد المبينه في شكل (1-41) منحنيات عامل الملء الى حد بعيد. ينزاح منحنى التوصيلية الى مكان جديد عند قيمة معينة لعامل التباعد او الملء كما مشار اليه في الشكل (1-41). يستخدم عامل الملء في بعض الأحيان كطريقة سريعة لفحص التغييرات في مقدار (قياسات) القطر الخارجي للقضبان المعدنية.

تأثير الحافة:

تتشوه التيارات الدوامية عندما يقترب ملف الفحص من نهاية او حافة الجزء المراد فحصه بسبب عدم امكانيته من الجريان (الإنسياب) وراء حافة الجزء. ينتج التشويه في التيارات الدوامية إشارة تُعرف بتأثير الحافة. يؤدي تأثير الحافة الى تقييد الفحص قرب الحافات بسبب ماله من تأثير كبير. لا يمكن التخلص من تأثير الحافة نهائياً مغايراً بذلك تأثير عامل التباعد. ان تقليص حجم الملف سوف يقلل الى حد ما من تأثير الحافة، إلا أن هناك حدود عملية تفرض حجماً معيناً لكل تطبيق. وعلى أية حال فلا ينصح بالفحص عندما يكون الملف أقرب من 3 ملم من حافة الجزء.

تأثير الجلد (السطح):

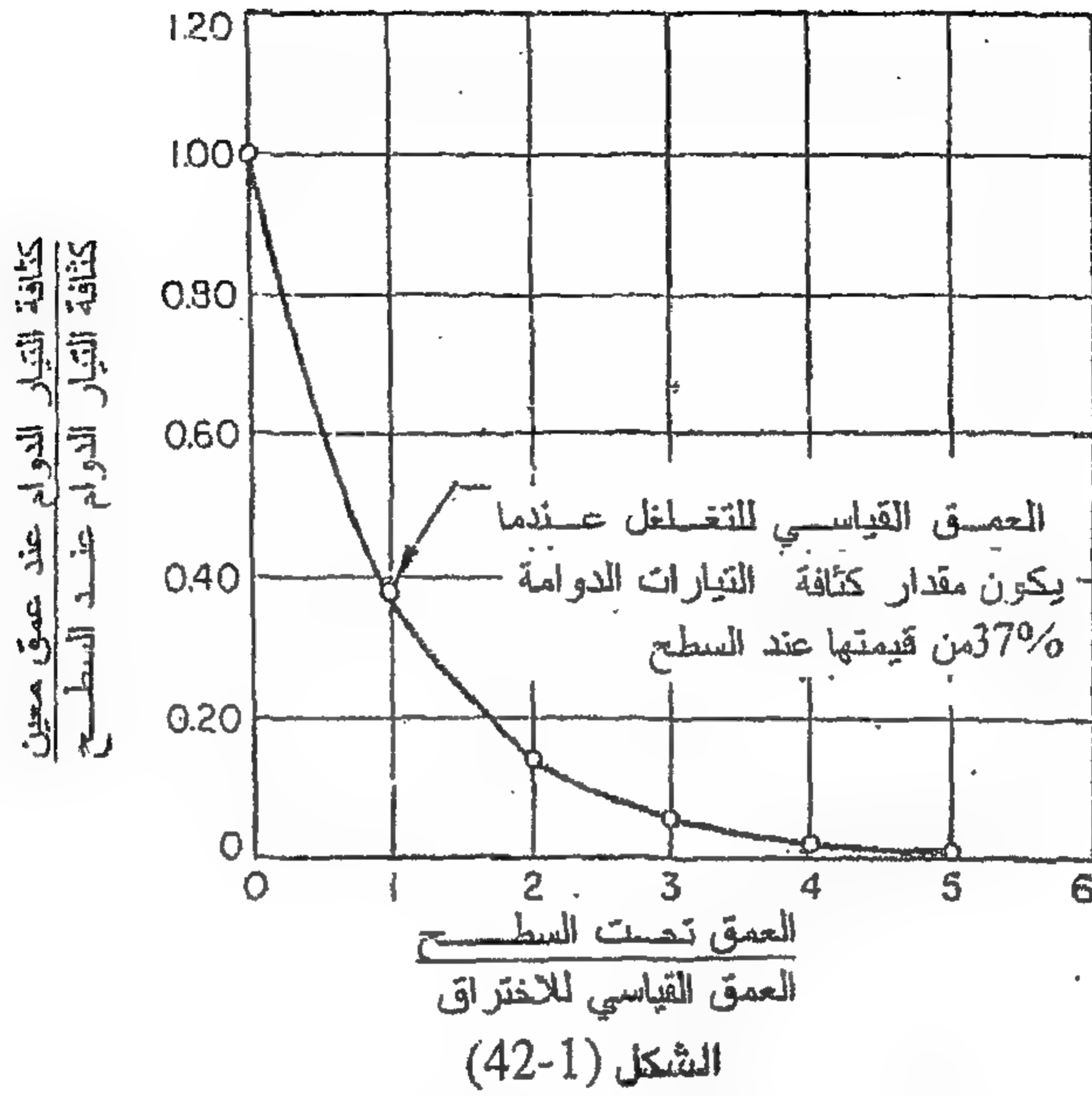
يؤثر شكل وسمك الجزء المفحوص نفسه على الإستجابة للتيارات الدوامة، إضافة الى العلاقة الهندسية الموجودة بين ملف الفحص و الجزء. لا يكون توزيع التيارات الدوامه منتظماً خلال الجزء المراد فحصه ، حيث أنها تكون اكثر كثافة عند السطح تحت الملف مباشرةً، وتقل كثافتها كلما ابتعدنا عن السطح وتعرف هذه الظاهرة «بتأثير الجلد» (Skin effect). تكون كثافة التيارات الدوامة صفراً عند مسافة معينة من سطح الجزء السميك.

يبين الشكل (42-1) كيفية تغير التيارات الدوامة كدالة مع البعد عن السطح. ويُعرف العمق الذي تنخفض فيه كثافة التيارات الدوامة الى حوالي 37% من كثافتها عند السطح « بالعمق القياسي للاختراق (standard depth of penetration). يعتمد هذا العمق على التوصيلية الكهربائية والنفذية المغناطيسية للمادة وعلى تردد التيار المغنط. فيقل عمق الاختراق مع زيادة التوصيلية والنفذية او تردد التيار عند الفحص. يمكن حساب العمق القياسي للاختراق من المعادلة الآتية:

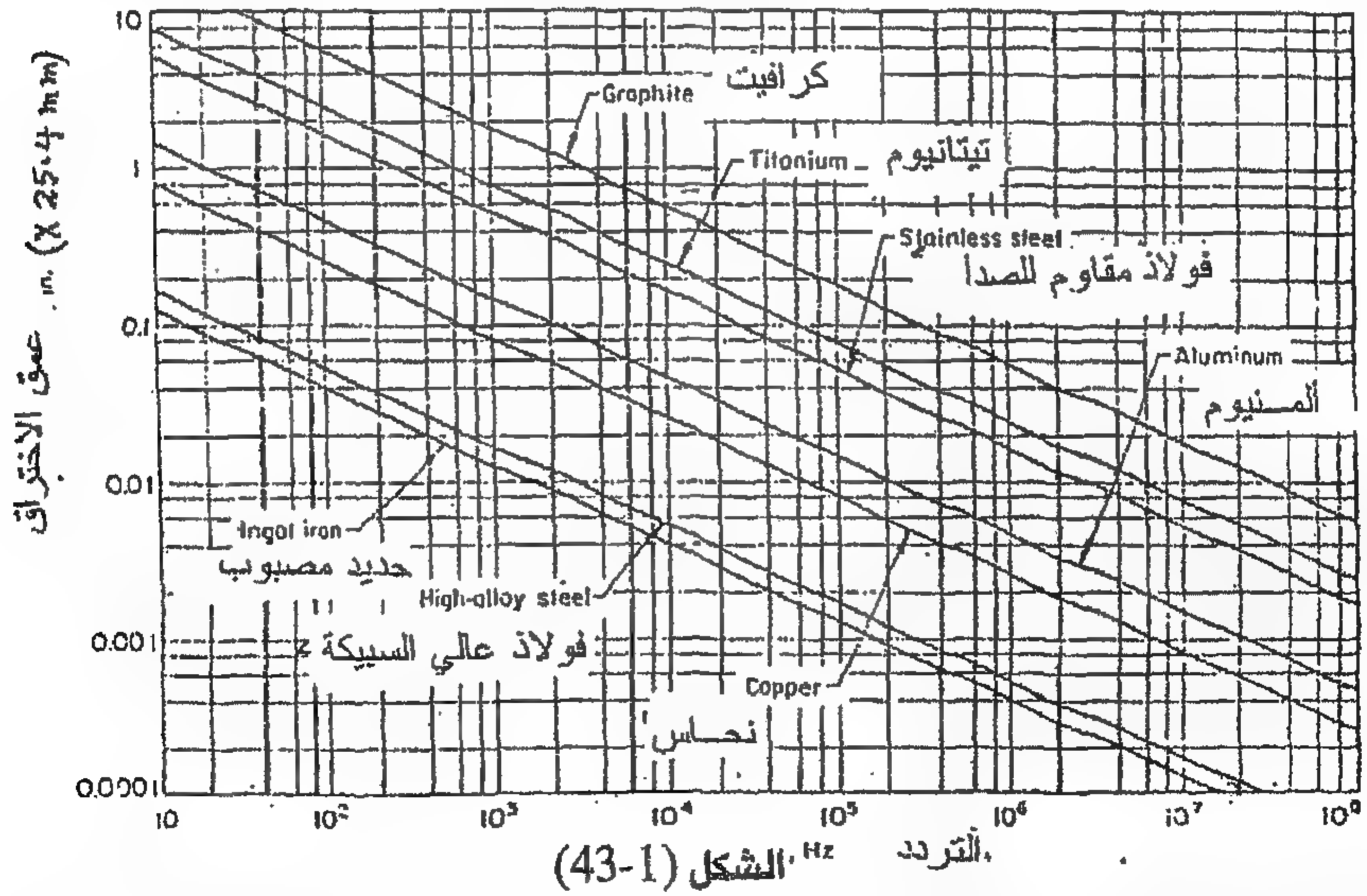
$$S = 4950 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \dots\dots\dots(8-1)$$

S هو العمق القياسي للاختراق (بالسنتيمتر)، ρ المقاومة (أوم - سنتيمتر) و μ النفذية المغناطيسية ($\mu = 1$ للمواد غير المغناطيسية) و f هو التردد المستخدم في الفحص (بالهيرتز Hz). يبين الشكل (43-1) العمق القياسي للاختراق كدالة للتردد المستخدم في الفحص بالتيارات الدوامه لمواد مختلفة التوصيلية الكهربائية.

إذا كان سمك المادة المراد فحصها أقل من العمق القياسي للاختراق فإن استجابة التيار الدوام ستعكس سمك المادة . فيكون من الضروري اذن التأكد من أن سمك المادة إما أن يكون ثابتاً او أكبر من العمق الذي يمكن للتيارات الدوامة اختراقه بالكامل. ويجب التذكر ان التيارات الدوامة لا تقف عند العمق القياسي للاختراق وانما تستمر الى ما بعد تلك المسافة بقليل. يجب أن يكون سمك الجزء المراد فحصه ضعفين او ثلاثة أضعاف العمق القياسي للاختراق عادةً لأجل ان لا يكون للسمك



تغير كثافة التيارات الدوامية مع العمق تحت السطح لجسم موصل - يدعى هذا التغير «بتأثير الجلد» اصطلاحاً.



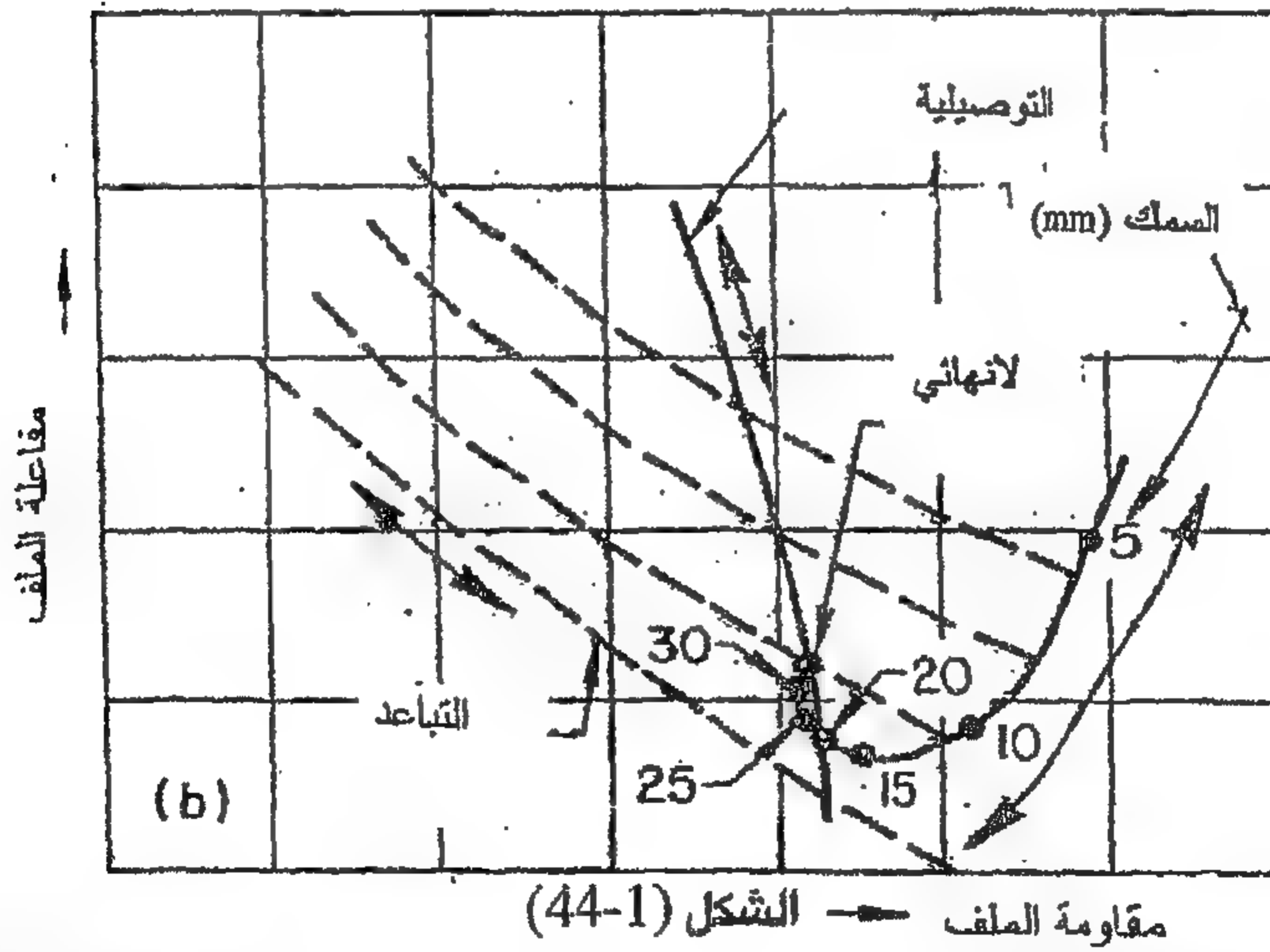
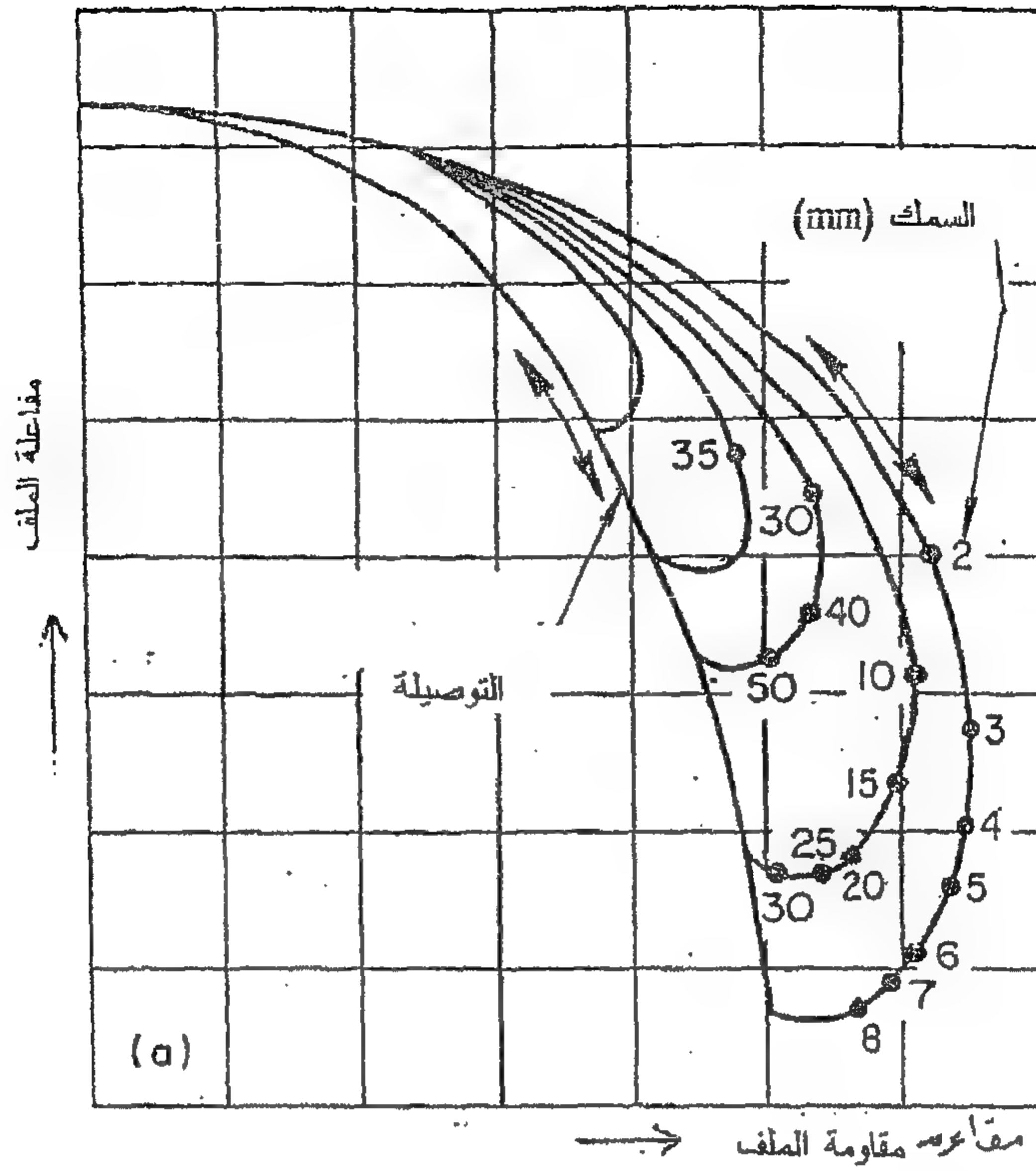
تغير العمق القياسي للتغلغل مع تردد التيارات الدوامية المستخدم في الفحص ، ولمعادن مختلفة التوصيلية الكهربائية .

تأثيراً على استجابة التيار الدوام. ومن الممكن معايرة جهاز الفحص بالتيار الدوام لقياس سمك المادة لئلا من تأثير مختلف على استجابة التيارات الدوامية. يتبع التغيير في سمك المادة المنحنيات في مستوى الممانعة كتلك الموجودة في شكل (1-44). فكما يظهر من المنحنيات تكون قياسات السمك بطريقة التيارات الدوامية أكثر دقة في المواد الرقيقة (الشكل 1-44b) مما هي عليه في المادة السميكة (الشكل 1-44a). والعكس صحيح عند قياس السمك بوساطة الأمواج فوق السمعية، ولذلك تكمل كلا الطريقتين أحدهما الأخرى.

ترددات الفحص:

يستخدم مدى من الترددات يتراوح بين 200 هيرتز إلى 6 ميكاهيرتز أو أكثر في تقنية الفحص بالتيارات الدوامية. يتم فحص أغلب المواد غير المغناطيسية عند ترددات بحدود بضعة آلاف هيرتز (Hertz). تستعمل ترددات واطئة، بصورة عامة، ابتداءً من حوالي 1 كيلو هيرتز لفحص المواد المغناطيسية. مع أن التردد المستخدم واقعاً يعتمد على سمك الجزء المراد فحصه وعمق الاختراق المرغوب ودرجة الحساسية أو قدرة التمييز (resolution) المطلوبة والهدف من الفحص.

يكون تردد الفحص عادةً حالة متوسطة، فيراعى في ذلك ظروف الفحص، على سبيل المثال، يجب أن يكون الاختراق كافياً للوصول إلى أي عيوب قريبة من السطح (تحت السطحية) ومن ثم يمكن كشفها. وبالرغم من أن مقدار الاختراق يزداد بنقصان التردد فهذا لا يعني أنه يجب استخدام الترددات الواطئة لأن الحساسية على كشف العيوب سوف تنخفض إلى حد ما كما تقل سرعة الفحص، إذن يجب أن يكون تردد الفحص منسجماً مع عمق الاختراق المطلوب. وتنشأ المشكلة عند فحص العيوب التي هي تحت السطح وإلى عمق معين ففي هذه الحالة تستخدم ترددات واطئة ويكون ذلك على حساب الحساسية أي أنه لا يمكن كشف العيوب الصغيرة. تستخدم الترددات الواطئة نسبياً عند فحص المواد المغناطيسية نظراً للاختراق القليل في هذه المواد. ويمكن الرجوع إلى المصادر المختصة في اختيار التردد الملائم وحسب مواصفات المادة المراد فحصها.



مخططات نموذجية للممانعة المستوية لمادة متغيرة السمك (a) مخطط لمادة سميكة
(b) مخطط لمادة خفيفة على تدريج موسع. مقدار تردد الفحص كان 100k Hz.

ملفات الفحص:

ان ملف الفحص جزء أساسي في أي منظومة فحص بالتيارات الدوامة. يعتمد شكل ملف الفحص الى حد كبير على الغرض من الفحص وعلى شكل الجزء المراد فحصه . فعند الفحص عن عيوب كالشقوق والثنيات فمن الضروري ان يكون مسار التيارات الدوامة عمودياً تقريباً على العيوب مهما أمكن لأجل الحصول على أعظم استجابة منها. ولا يحدث اي تشويه او قد يحدث قليل من التشويه للتيارات إذا كان مسار التيارات الدوامة موازيه للعيوب وعليه سيحدث رد فعل قليل جداً على ملف الفحص.

الملفات المحيطة وملفات المجسات:

تبقى نوعاً الملفات المحيطة وملفات المجسات هي الأكثر استخداماً في فحص التيارات الدوامة من بين العديد من أنواع الملفات المستخدمة. يتم في العادة استعمال ملف المجس في فحص الشقوق السطحية لأن هذا النوع من الملفات يستحث تيارات مسارها موازي للسطح ومن ثم تقطع الشقوق كما في شكل (45a-1) . في حين ان ملفات المجسات غير ملائمة للكشف عن العيوب الصفائحية. يستخدم للعيوب الصفائحية ملف على شكل حذاء الفرس كما في شكل (45b-1).

يتم استخدام الملفات المحيطة بشكل عام لفحص الأنابيب والقضبان (الشكل 45c-1) وذلك لملائمة شكل الأجزاء والسرعة العالية لهذا النوع من الملفات، إلا أن هذا النوع من الملفات ملائم فقط للعيوب الموازية لمحور الجزء . ان أغلب العيوب الموجودة في مثل هذه الأجزاء والمتولدة أثناء عمليات تصنيعها موازية للمحور. أما إذا أريد فحص عيوب غير موازية للمحور فيستخدم ملف المجس لذلك. والكشف عن العيوب في السطوح الداخلية للأنابيب فيستخدم ملف داخلي كما في شكل (45d-1).

الملفات المتعددة:

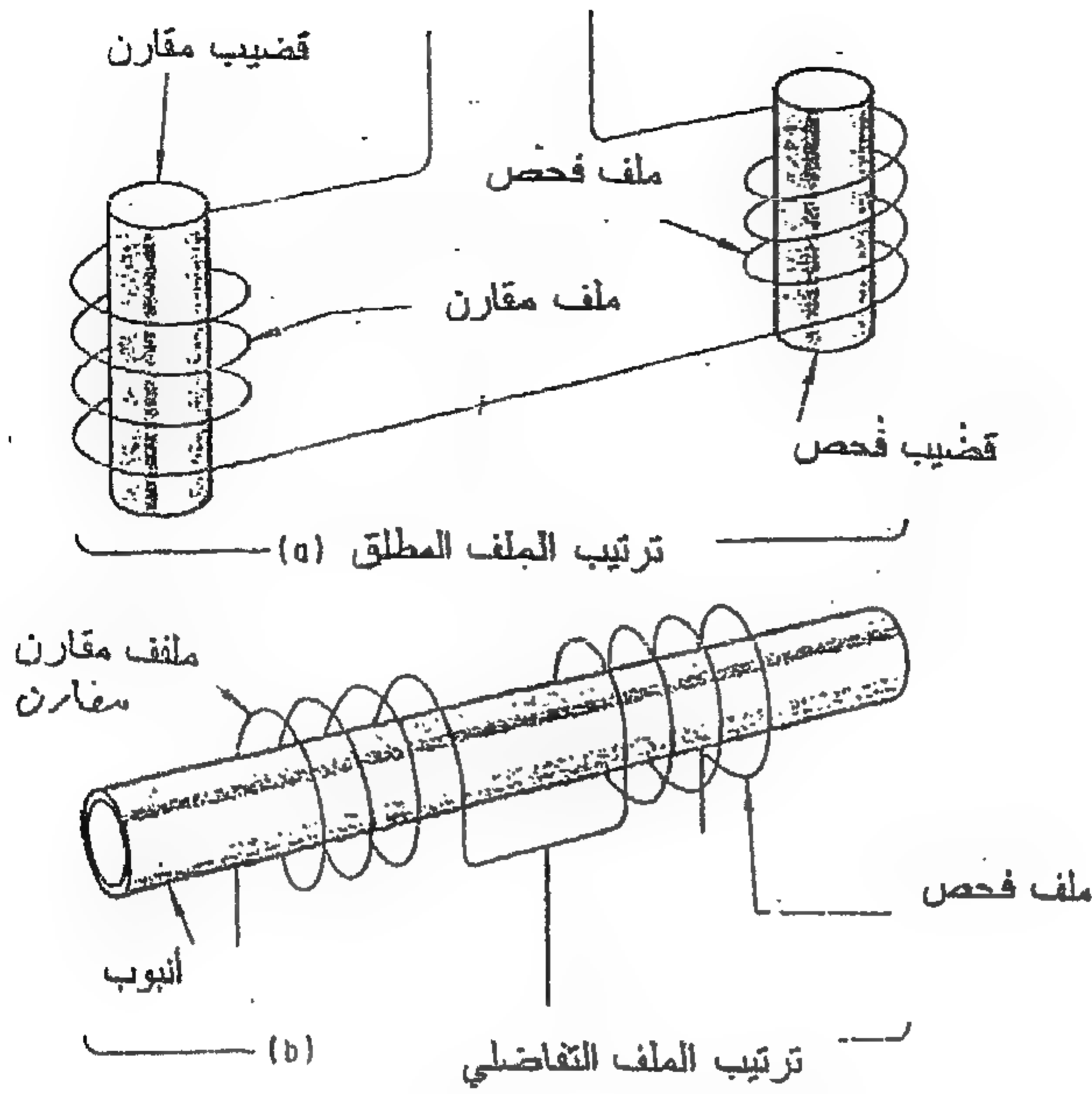
تستخدم في العديد من فحوصات التيارات الدوامية ملفين مربوطين على التوالي بشكل متخالف بحيث أنه عندما تكون ممانعتا هما متساوية لا ينتج أي حاصل من هذا الإزدواج. ويمكن استخدام زوج الملفات إما بالشكل المطلق أو بالشكل التفاضلي كما في الشكل (1-46). ففي الحالة المطلقة يوضح نموذج مقبول (مستوفى للشروط أي خالي من العيوب) في أحد الملفين ويستخدم الآخر للفحص. وهنا تتم معايرة الجزء المراد فحصه مع الجزء القياسي (المقبول) ويتم التحسس بالفرق بينهما، إن وجد، بواسطة جهاز ملائم. تستخدم هذه التقنية في التفريق أو الفصل بين المواد.

ومن الممكن استخدام الربط التفاضلي (الشكل 1-46b) عندما يراد التحسس بالفروق في قطر الأنبوب. فعندما تكون مقاطع الأنبوب متساوية فلا يكون هناك أي حاصل نهائي (out put) أما إذا كان هناك فرق بين مقطعي الأنبوب عند منطقة كل من الملفين فيمكن ملاحظة الإشارة وكذلك الحال عندما يوجد عيب في منطقة أحد الملفين،

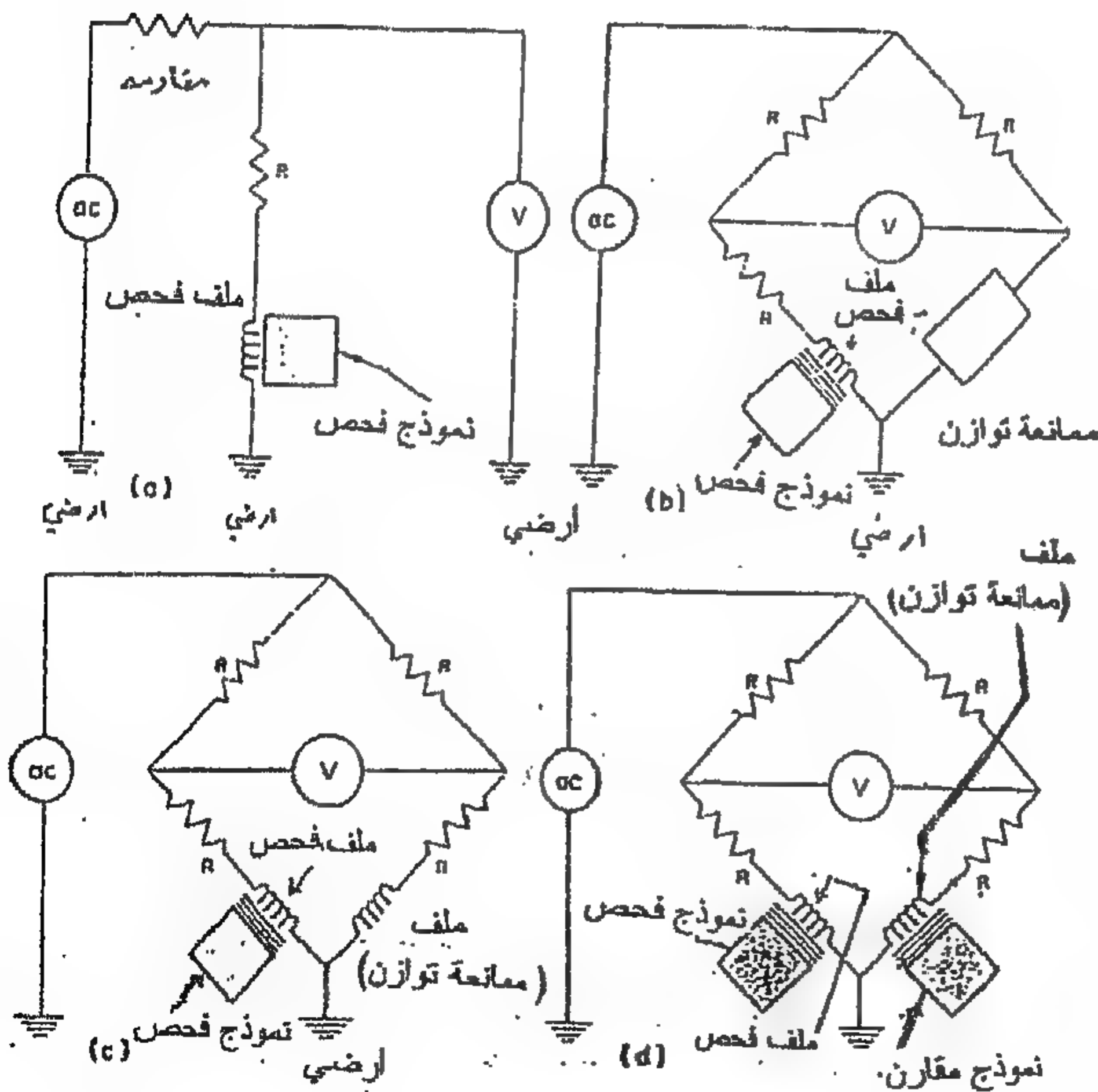
أجهزة التيارات الدوامية:

يبين الشكل (1-47a) مخطط لجهاز فحص بسيط بالتيارات الدوامية والذي تراقب فيه الفولتية على طرفي ملف الفحص. وهذه الدائرة ملائمة لقياس تغييرات تباعد كبيره، إذا كانت الدقة غير مهمة جداً. أما الدائرة المبينة في الشكل (1-47b) فمصممة لدقة أكبر. وهذا الجهاز يتألف من مصدر منفرد وقنطرة ممانعة مع مقاومات اسقاطية وملف فحص في أحد أذرع القنطرة وممانعه معادلة في الذراع الأخرى. يقاس الفرق في الفولتية بين ذراعي القنطرة بفولتيميتر التيار المتناوب. وكبديل فالممانعة المعادلة في الذراع المقابل لملف الفحص يمكن أن تكون ملف مشابه لملف الفحص كما في الشكل (1-47c) وقد يكون هناك نموذج أساس (قياسي) في الملف (الشكل 1-47d). ففي الحالة الأخيرة إذا كانت كل أجزاء القنطرة متناظرة فتحدث الإشارة فقط عندما تحيد ممانعة ملف الفحص عن تلك التي لملف النموذج الأساس.

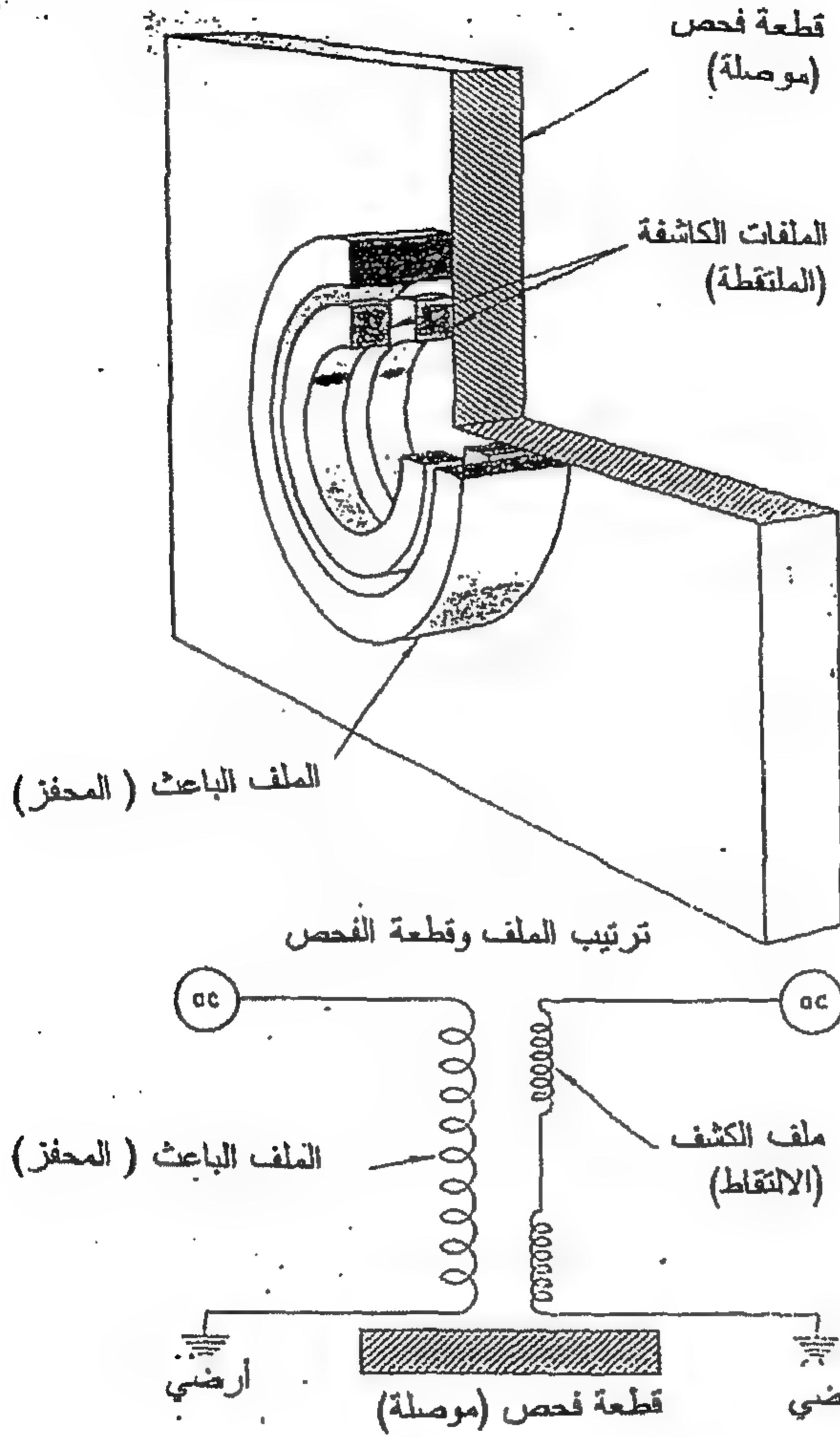
شكل (1-46)
الترتيبات المطلق
والتفاضلي
للملفين المضاعفين
المستخدمين في
الفحص
بالتيارات الدوامة



شكل (1-47)
أربعة أنواع من أجهزة
الفحص بالتيارات الدوامة
(a) ترتيب بسيط وفيه تتم
السيطرة على الفولتية على
طرفي الملف (b) قنطره
ممانعه نموذجية (c) قنطره
ممانعه بزوج من الملفات
(d) قنطرة ممانعه بزوج
من الملفات ونموذج قياس
(مقارن) في الملف الثاني



يوجد نوع آخر من القنطرات المستخدمة في الفحص والتي تنتقل إشارة القدرة فيها بواسطة محول مزدوج الى ملفين أحدهما الملف الأساس والآخر ملف الفحص كما في الشكل (48-1) . أما مبدأ الفحص فمتشابه في كل أجهزة الفحص تقريباً وكما تم شرحه سابقاً.



الشكل (48-1)

مجس قنطرة حث في مكانٍ على سطح القطعة المراد فحصها.
رسم تخطيطي يبين كيفية التحويل المزدوج للإشارة عالية الطاقة من الملف الباعث الى ملفي الكشف (ملف الفحص في الأسفل والملف القياسي في الأعلى).

٦-٤-١ الفحص بالأمواج فوق السمعية:

المقدمة:

الأمواج الصوتية هي ذبذبات ميكانيكية تتضمن حركة دقائق الوسط الذي تنتقل فيه . فتتذبذب دقائق الوسط مسببةً تشويهاً حيث تنتقل الطاقة من دقيقة (جسيمة) الى أخرى على طول طريق الموجه. ولهذا لا يمكن للصوت الانتقال في الفراغ . ينتقل الصوت في المواد بصوره مختلفة تبعاً لطبيعة وخواص المادة. للذبذبات بطبيعتها تردد، وهو عدد الذبذبات التي تحصل بالثانية الواحدة ووحداته هي ذبذبة بالثانية او هيرتز (Hertz) ومضاعفاتها حسب الوحدات العالمية حيث أن 1 هيرتز (Hz) يعني ذبذبة واحدة في الثانية.

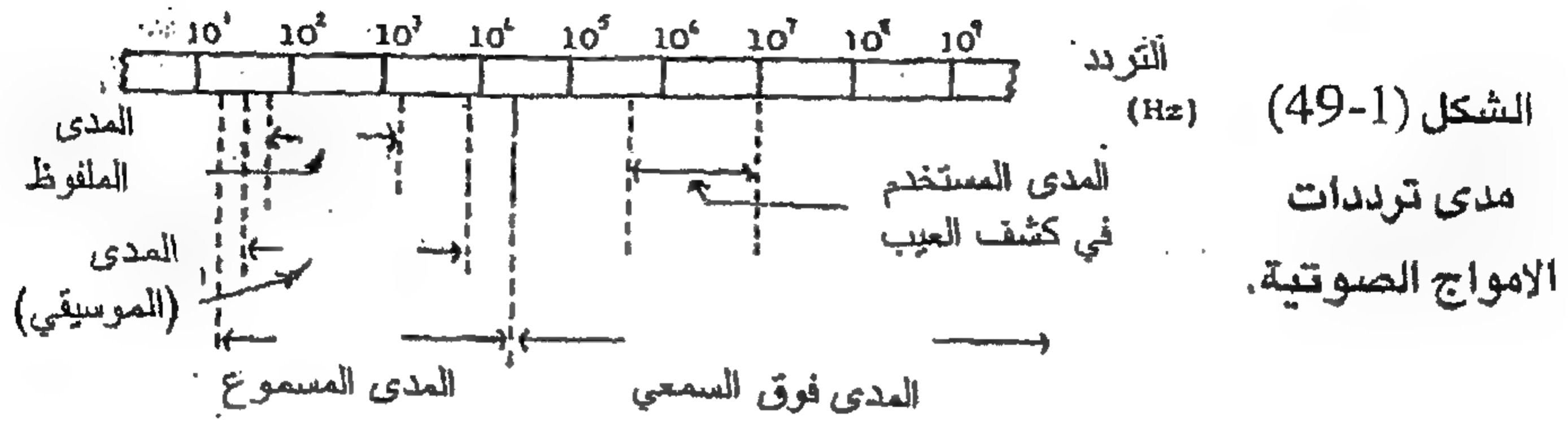
لقد تم استخدام الأمواج الصوتية منذ امدٍ بعيد لفحص جودة او سلامة المواد وكمالها (عدم وجود عيب فيها). فقد استعملت هذه الأمواج ، على سبيل المثال، لفحص سلامة عجالات عربات السكك الحديدية وذلك بنقرها وسماع الصوت المتولد منها، ومن ثم يمكن التمييز بين ما هو معاب وما هو سالم منها. تعتبر تقنية فحص العيوب بالذبذبات فوق السمعية هي ببساطة امتداد وتفنن في هذه التقنية.

ويقل سماع الموجات الصوتية كلما ازداد ترددها حتى تصل الى حدٍ لا يمكن للأذن البشرية التحسس بها وتسمى عندئذٍ ذبذبات او أمواج فوق سمعية.

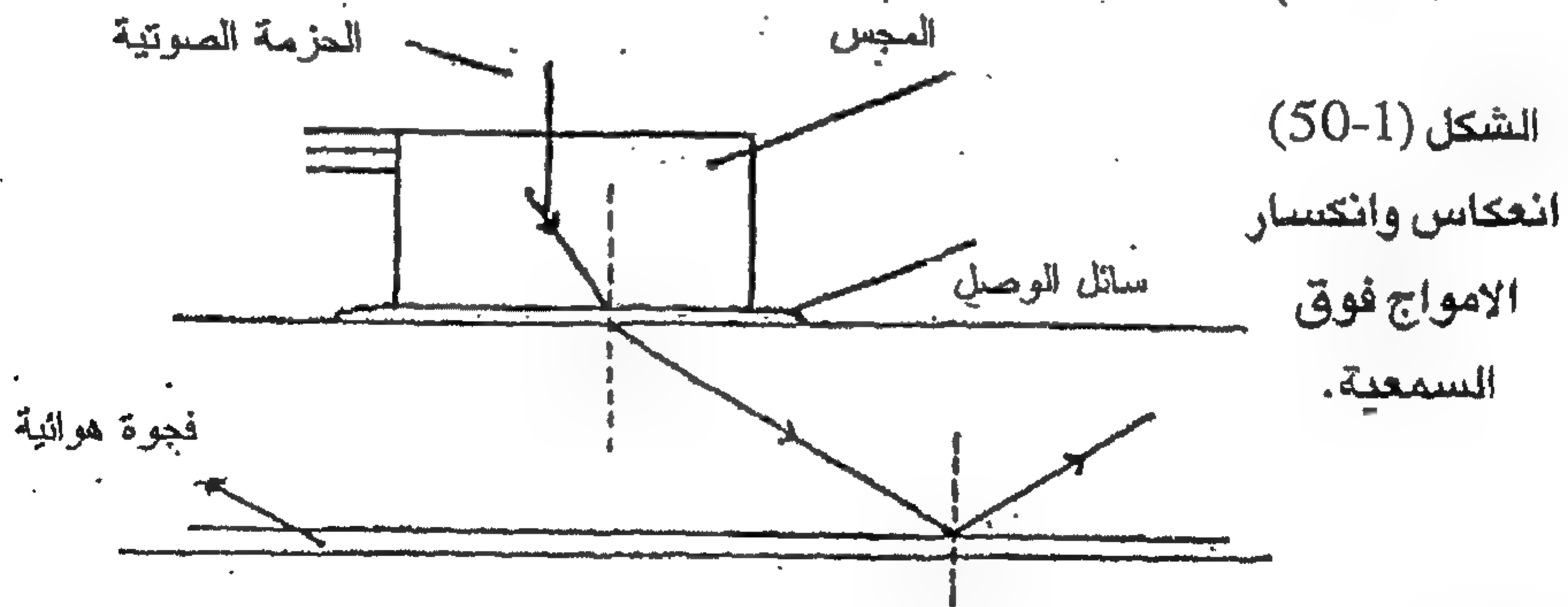
للأمواج الصوتية طيف من الترددات وكل نوع له مدى تردد خاص به بشكل يشابه تقريباً الأمواج الكهرومغناطيسية من هذه الناحية فقط. يبين الشكل (1-49) مدى تردد (frequency) الأمواج الصوتية التي من ضمنها الأمواج فوق السمعية.

يتضمن المدى الكامل لتردد الصوت كلاً من المدى تحت السمعي (infrasonic) الذي يكون تردده أقل من 16 هيرتز والمدى السمعي الذي تردده بين 16

هيرتز و 20 كيلو هيرتز (الذي يكون مسموعاً من قبل الأذن البشرية) والمدى فوق السمعي الذي تردده من 20 كيلو هيرتز حتى 1000 ميكاهيرتز أو أكثر. ان الترددات المستخدمة في تقنية الفحص بالأمواج فوق السمعية هي في حدود 0.5 الى 20 ميكاهيرتز تقريباً.

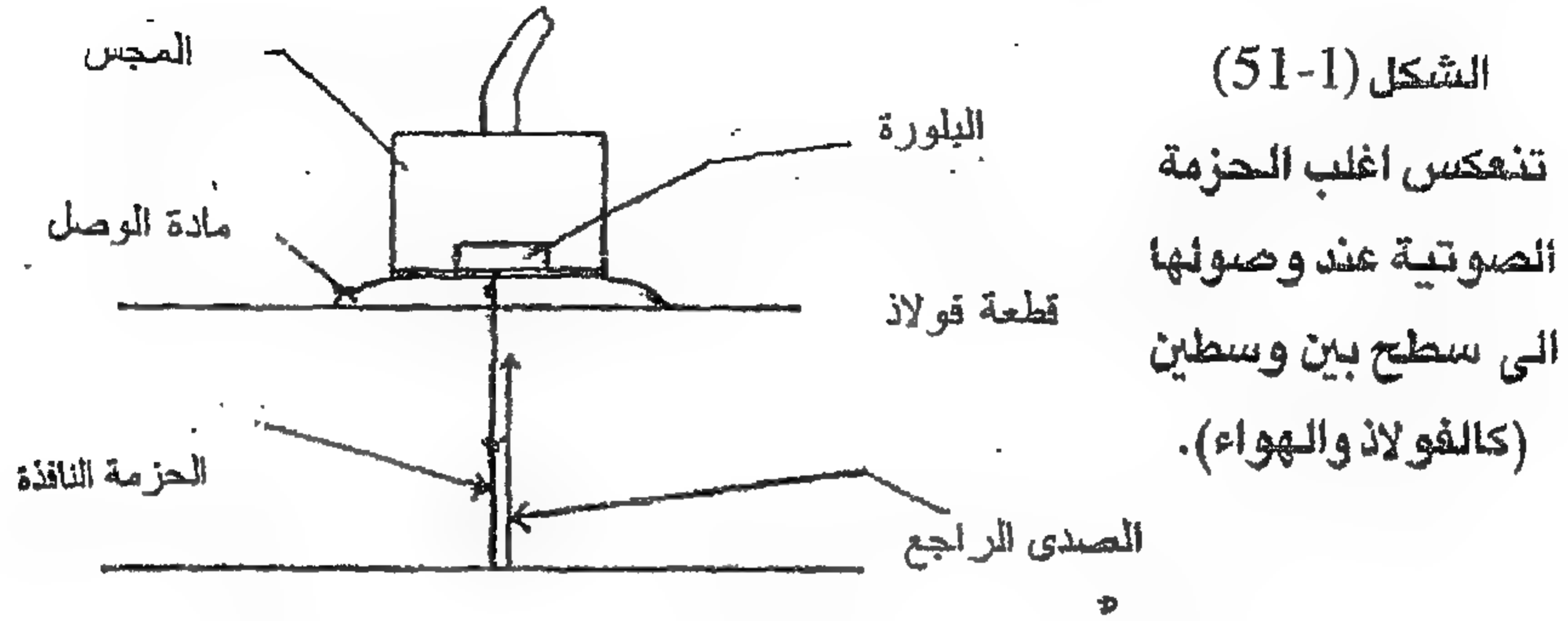


ومن الجدير بالذكر ان للأمواج فوق السمعية خاصية مهمة بالنسبة الى الفحص اللا اتلافي وهي أنها يمكن ان تنتقل خلال الأجسام الصلبة، شأنها في ذلك شأن بقية الأمواج الصوتية . كما أنها تخضع لنفس القوانين الفيزيائية التي تخضع لها الأمواج الأخرى كالانعكاس والانكسار وغيرها ، كما يبدو من الشكل (1-50) . فعلى سبيل المثال، عند انتقال الصوت من وسط الى آخر فإنه سوف ينكسر (أي أن اتجاه سيره يتغير قليلاً).



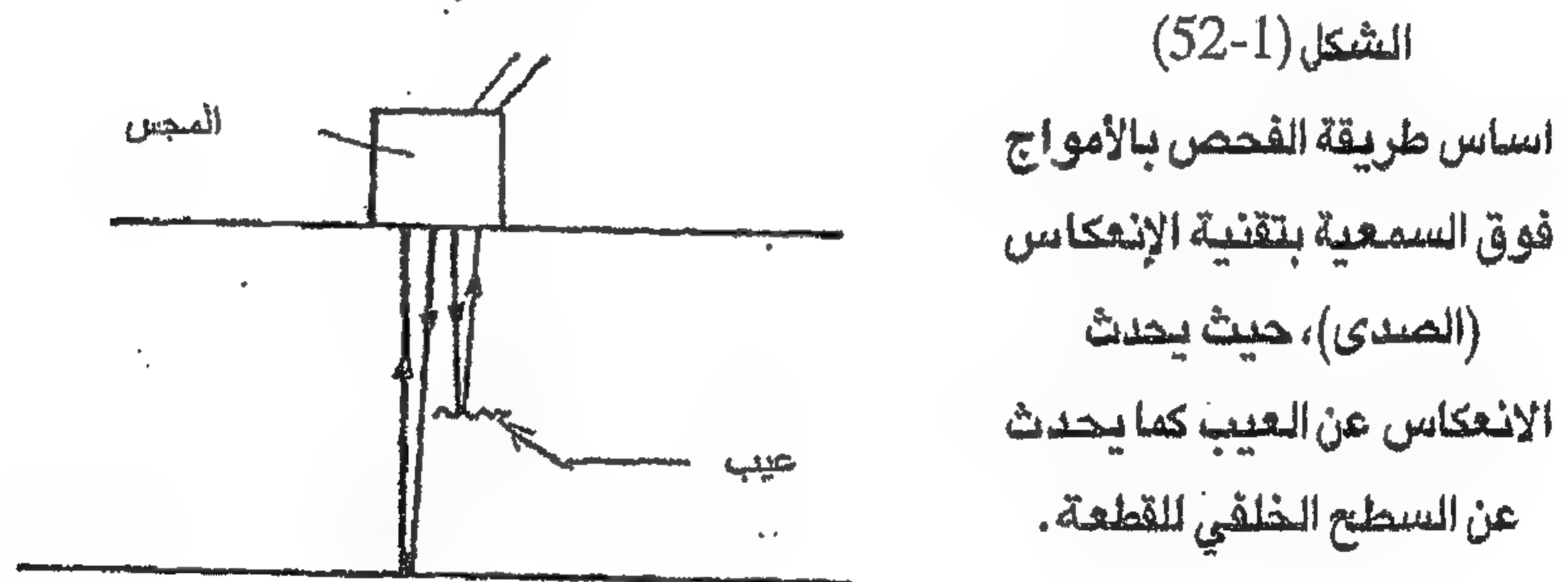
يمكن أن ينعكس الصوت، كما في حالة الضوء، عندما يصل الى او يصطدم بمنطقة تتغير فيها خواص المادة. فعند وصول الصوت المنتقل في قطعة من الفولاذ

الى سطحها الثاني فينعكس اقلية راجعاً (حسب قوانين الانعكاس) بدلاً من ان يستمر بسيره وينفذ الى الهواء، الشكل (51-1).



ولو فرض ان هناك شقاً في داخل الفولاذ (أي عدم استمرارية في المعدن (discontinuity) او اكتنافات (inclusions) (مثل قطعة صغيرة محصوره من الخبث) فعند وصول الموجه الصوتية الى هذه العيوب فسوف تنعكس ايضاً.

تزودنا هذه الخاصية بأساس طريقة كشف العيوب لا أتلافياً، الشكل (52-1).



يجب ان تتم إمالة (توجيه) الموجه الصوتية بحيث أن أكبر مقطع عرضي للعيب يكون عمودياً على الموجه وذلك لأجل التحسس الأمثل للعيب.

توجد بعض المتطلبات لنجاح هذه التقنية وهي:

١- مادة (وسط) تسمح بمرور الصوت من مصدر تكوينه الى الجسم المراد فحصه.

٢- عدم اعاقه سير الموجه بسبب الانعكاسات، على سبيل المثال، والنااتجة من طبيعة بنية المادة المفحوصة (كقشور الكرافيت في حديد الزهر) ومن ثم وصولها الى العيوب المراد الكشف عنها عند وجودها في النموذج.

٣- معرفة اتجاه العيوب او امكانية مسح العيوب من كل الزوايا والاتجاهات.

٤- امكانية وصول الحزمة الصوتية لكل مساحات القطعة المراد فحصها. ويعني هذا ان الشكل الهندسي للقطعة المفحوصة مهم جداً.

أما ما هو حجم العيب الممكن كشفه فيعتمد على عدة عوامل . ومن المهم أن يكون التردد المستخدم عند الفحص بالأمواج فوق السمعية اعلى تردد ممكن بالتساوي مع الامكانية باختراق مقطع القطعة المفحوصة عند ذلك التردد وذلك لأجل التحسس بأصغر عيب ممكن.

ولأجل ايضاح هذه النقطة تصور أن بحيرة كبيرة ماءها ساكن، القى في مركزها حجر كبير فإن أمواجاً كبيرة سوف تتولد وبطول موجي كبير (λ) (المسافة بين قمتين متجاورتين في الموجه) والتي سوف تنتشر مبتعدة عن نقطة القاء الحجر (المركز) والى مسافة كبيرة لأنها ذات طاقة عالية ولكن بتردد منخفض مسبباً.

فإذا صادفت الأمواج الكبيرة هذه عائقاً صغيراً في طريقها فإن الإنعكاس سيكون صغيراً وسيضمحل بسرعة. فلو تصورنا ان العائق الصغير يمثل عيب صغير فيتبين من ذلك أن مقدار تحسس هذا العيب بالأمواج ذات الترددات المنخفضة سيكون قليل او منخفض ايضاً.

أما عند القاء حجر صغير في البحيرة فستتولد موجات متقاربة (صغيرة الطول الموجي) أي عالية التردد، ومع ان هذه الأمواج تضمحل قبل ان تصل الى مسافات كبيرة فإن العوائق الصغيرة تولد إشارات (علامات) انعكاس واضحة جداً.

ومن هنا يفهم ان الأمواج الصوتية ذات الترددات العالية (الطول الموجي القصير) لها حساسية قليلة (أي مسافة تغلغلها في المادة قليلة) لكن قدرة كشفها للعيوب الصغيرة عالية والعكس صحيح اي أن الأمواج ذات التردد المنخفض (اي طول

موجي كبير) لها حساسية عالية (مسافة تغلفها في المادة كبيرة) لكن قدرة كشفها للعيوب الصغيرة منخفضة.

تكون طبيعة الاهتزازات (الأمواج) فوق السمعية، على النقيض من طبيعة الاهتزازات السمعية، عدم النفوذ بسهولة خلال الغازات ، ومع ذلك فالاهتزازات فوق السمعية تمر بيسر خلال السوائل والأجسام الصلبة وتستطيع ان تقطع مسافات طويلة جداً بشرط ان تكون الأوساط التي تمر بها متجانسة . فالثغرات او السطوح البينية (خصوصاً مع الهواء) تؤدي الى إنعكاس الذبذبات فوق السمعية بشكل تام تقريباً.

يمكن استخدام الفحص بالأمواج الصوتية باستعمال الترددات السمعية للكشف عن العيوب في الخزفيات والفخاريات (Pottery and ceramics) بوساطة قرعها وكذلك يمكن تحسس العيوب في دواليب عربات السكك الحديدية بوساطة عملية نقر الدولاب (wheel tapping) كما أشرنا الى ذلك سابقاً.

سرعة الأمواج الصوتية:

تختلف سرعة الأمواج الصوتية باختلاف الاوساط حيث تعتمد على خواصها الفيزيائية والميكانيكية.

تقسم الموجات الصوتية الى نوعين:

أ- الأمواج الانضغاطية او الطولية (Compression or Longitudinal waves)، وهي الامواج التي تكون حركة دقائق الوسط فيها موازية لإتجاه سير الموجه. كما هو الحال عندما يهتز نابض حلزوني محمّل فتكون حركة الحلقات ، صعوداً ونزولاً موازية لإتجاه تقدم الموجه.

ب- الأمواج القصية او المستعرضة (Shear or transverse waves) وهي الأمواج التي تكون فيها حركة دقائق الوسط عمودية على اتجاه سير الموجه. كما هو الحال عند القاء حجر في بركة ماء ساكنة فتكون حركة جزيئات الماء، أو أية دقائق طافية عليه، صعوداً ونزولاً عمودية على اتجاه تقدم الموجه.

يمكن أن يعبر عن سرعة الأمواج الطولية (V_c) في السوائل بالآتي:

$$V_c = \left(\frac{K}{\rho} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(9-1)$$

حيث تمثل K الانضغاطية و ρ الكثافة. أما في المواد الصلبة فيمكن إعطاء السرعة بالعلاقة التالية:

$$V_c = \left(\frac{E(1-\nu)}{\rho (1+\nu)(1-2\nu)} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(10-1)$$

حيث أن E معيار المرونة و ν نسبة بويزن.

يبين الجدول (14-1) مقادير سرع الموجات الطويلة في عدد من المواد المألوفة .

جدول (14-1) سرع الموجات الطولية الصوتية في بعض المواد

الوسط او المادة	السرعة (V_c) متر / ثا
الهواء*	330
الماء	1430
الزيت	1740
الالمنيوم	6190
النحاس	4600
المغنيسيوم	5770
الفولاذ	5810
البيرسبكس Perspex	2730
البولي اثلين	2340

* عند الضغط الجوي وعند درجة حرارة 15°م.

أما سرعة الأمواج القصية (V_s) في الأجسام الصلبة فهي نصف مقدار سرعة الأمواج الطولية على وجه التقريب، وهي تعطى بالعلاقة التالية:

$$V_s = \left(\frac{G}{\rho} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(11-1)$$

حيث تمثل G معيار الجسوء للمادة.

الطول الموجي :

يتعلق الطول الموجي (λ) بالتردد (f) وسرعة الموجه V كالآتي :

$$V = \lambda f \dots\dots\dots(12-1)$$

والجدول (15-1) يعطي الأطوال الموجية للصوت عند عدد من الترددات ولخلاف المواد.

وعلى غرار الأنواع الأخرى من الأمواج، تنعكس الأمواج الصوتية بصورة مؤثرة فقط عند اصطدامها بأجسام أبعادها مساوية أو أكبر من الطول الموجي للموجه الساقطة ، ولذا يكون واضحاً من الجدول (15-1) ان حزمة الأمواج فوق السمعية التي لها تردد 10 ميكا هيرتز ، على سبيل المثال، ستكون قادرة على كشف العيوب التي قياسها أكبر من 0.58 ملم في الفولاذ، لكنه يمكن تحسس العيوب الأكبر من 4.65 ملم عند استخدام تردد مقداره 1.25 ميكا هيرتز.

جدول (15-1) الأطوال الموجية للموجات الطولية (الانضغاطية) للصوت لمختلف المواد.

الطول الموجي (λ) (ملم) لعدد من الترددات (f)				المادة
10.0 MHz	5 MHz	2.5 MHz	f= 1.25 MHz	
0.033	0.066	0.13	0.26	هواء
0.143	0.286	0.57	1.14	ماء
0.175	0.35	0.70	1.39	زيت
0.62	1.24	2.48	4.95	ألنيوم
0.46	0.92	1.84	3.68	نحاس
0.58	1.16	2.31	4.62	مغنيسيوم
0.58	1.16	2.32	4.65	فولاذ
-	0.55	1.09	2.18	بيرسبكس
-	0.47	0.94	1.87	بولي أثلين

انعكاس الأمواج الصوتية ونفوذها:

هناك محدوديات لعبور الموجات الصوتية بين وسطين مختلفين من حيث خواص المرونة. فعند وصول حزمة من الأمواج الصوتية الطولية الى الحد الفاصل بين وسطين فإن جزءاً من الأمواج الساقطة سوف ينعكس عند الحد الفاصل والجزء الآخر منها سوف ينفذ الى الوسط الثاني عبر الحد الفاصل. فإذا سقطت الأمواج على الحد الفاصل بصورة عمودية فإن الجزء النافذ عبر هذا الحد يكون من نوع الأمواج الطولية (الانضغاطية). يمكن تعيين معامل الانعكاس (R) ومعامل النفوذ (T) من الممانعة الصوتية (acoustic impedance) لكلا الوسطين Z_1 و Z_2 اللذين مرّت بهما الحزمة . يمكن التعبير عن الممانعة الصوتية لأي مادة بالآتي:

$$Z = \rho V_c \dots\dots\dots(13-1)'$$

حيث تمثل ρ كثافة المادة و V_c سرعة الأمواج الانضغاطية فيها. يتم التعبير عن معامل الانعكاس (R) للموجات الصوتية التي تسير خلال الوسط (1) عابرةً السطح الفاصل بين الوسط (1) الى الوسط (2) بالآتي:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 V_{c2} - \rho_1 V_{c1}}{\rho_2 V_{c2} + \rho_1 V_{c1}} \dots\dots\dots(14-1)$$

ومن ذلك يكون معامل النفوذ T (أي نسبة ما ينفذ من طاقة الامواج الصوتية عبر السطح الفاصل بين وسطين) كالآتي:

$$T = \frac{2 Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{2\rho_1 V_{c1}}{\rho_2 V_{c2} + \rho_1 V_{c1}} \dots\dots\dots(15-1)$$

أي أن :

$$R + T = 1 \dots\dots\dots(16-1)$$

يتضمن الجدول (16-1) قيم الممانعات الصوتية لأوساط مختلفة.

جدول (16-1) الممانعات الصوتية لبعض الأوساط.

الوسط	الممانعة الصوتية (ميكا باسكال ثانية / متر)
الهواء	4.04×10^{-4}
الماء	1.43
الزيت	1.58
الألمنيوم	16.77
النحاس	41.08
المغنيسيوم	10.04
الفولاذ المطيل	45.72
البرسبكس	3.22
البولي اثيلين	2.16

يعتبر انعكاس الصوت عند السطح بين الهواء والمعدن، من الناحية التجريبية يساوي 100% عند الترددات المستخدمة في الفحص بالأمواج فوق السمعية، ولهذا لا تستطيع هذه الأمواج النفوذ بسهولة الى المعدن عبر فجوة هوائية وإن كانت ضيقة. فإذا تم وضع سائل مثل الزيت أو الماء كحلقة وصل أو عامل وصل بين المجس (بلورة محول الطاقة) (transducer crystal) والمعدن فسينخفض معامل الانعكاس الى حدٍ ما. فعلى سبيل المثال، يكون الانعكاس 94 بالمئة، تقريباً، عند الحد الفاصل بين الزيت والفولاذ، أي بعبارة أخرى، أن حوالي 6 بالمئة من طاقة الصوت الساقط سوف ينفذ عبر السطح الفاصل.

تتحسن كفاءة النفوذ بصورة ملحوظة عندما يكون سمك سائل الوصل بين محول الطاقة (المجس) والمعدن هو فقط جزء قليل جداً من الطول الموجي للحزمة

الصوتية في ذلك الوسط. فعلى سبيل المثال، يقترب معامل النفوذ من القيمة النظرية (13 بالمئة) عندما يكون وجه مجس البلورة مغطى بالبيرسبكس في حالة استخدامه مقترناً مع الفولاذ بشرط ان يكون سمك غشاء سائل الوصل (couplant film) قليلاً. وحيث ان معامل النفوذ يتغير مع سمك الغشاء ومالم تتم المحافظة على قوة ضاغطة ثابتة بين المجس وسطح المعدن، فإن شدة حزمة الأمواج فوق السمعية الداخلة الى المعدن ستكون عرضة للتغيير الملحوظ.

توليد الموجات فوق السمعية والكشف عنها:

يعتمد توليد الأمواج فوق السمعية ، المستخدمة في الفحوصات اللا أتلافية، على التأثير الكهربائي الاجهادي (Piezo-electric effect) والذي تتصف به بعض أنواع البلورات الطبيعية كالكوارتز (quartz) والاصطناعية ككيتانيت الباريوم (barium titanate) ونيوبات الرصاص (Leadniobate) وكبريتات الليثيوم (Lithium sulphate). تتمدد وتتقلص هذه البلورات بمراحل مع الفولتية النبضية المسلطة على طرفي البلورة اي على وجهين متقابلين منها. ان هذه الفولتية تجعل البلورة تهتز عند تردداتها الطبيعي.

يكون من المطلوب ، بعد انقطاع هذه الفولتية، ان تزول او تموت ذبذبات البلورة بأسرع مايمكن .تدعم البلورة عادةً بمادة تخميد (damping material) وذلك لتساعد على اخماد الذبذبات بسرعة. وقد وُجد ان العكس صحيح في التأثير الكهربائي الاجهادي، فالإجهاد الميكانيكي المسلط على مثل هذه البلورات باتجاه معين يولد تجاوباً كهربائياً، والفولتية الناتجة تتناسب بشكل مباشر (خطي) مع مستوى الاجهاد. ان وحدة الإستلام المستخدمة في الفحص بالأمواج فوق السمعية هي محول الطاقة الميكانيكية الكهربائية (electro- mechanical transducer) اي انه يحول او يبدل الطاقة الميكانيكية المنبعثة من الأمواج فوق السمعية الى طاقة كهربائية حيث يمكن قياس الفولتية المستحثة الناتجة.ويمكن ان تعمل البلورة الكهربائية الإجهادية كلا العاملين كمرسلة (باعثة)،وكمستلمة للأمواج فوق السمعية، اي يمكن أن تستخدم كمحول طاقه عكسي (reversible transducer) أيضاً.

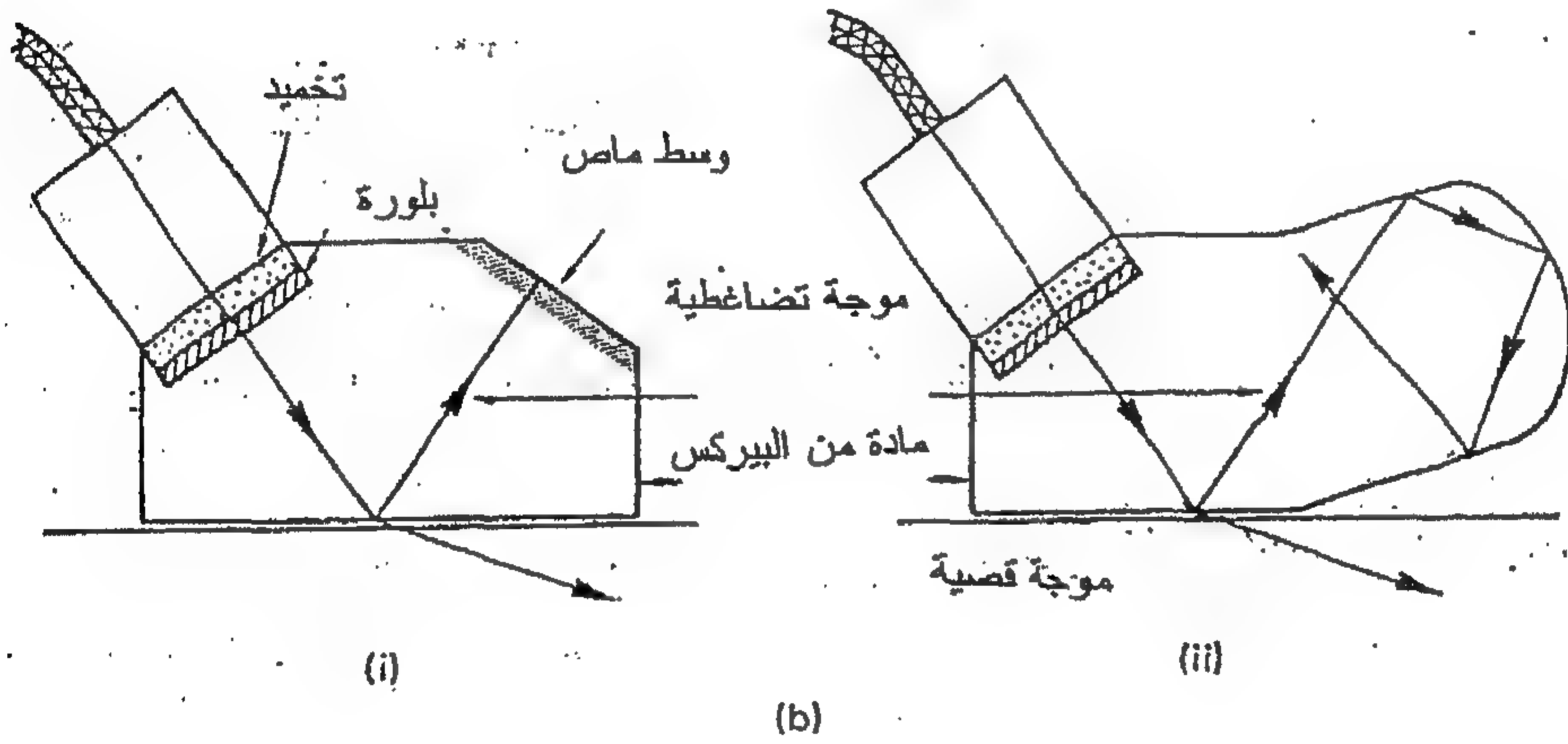
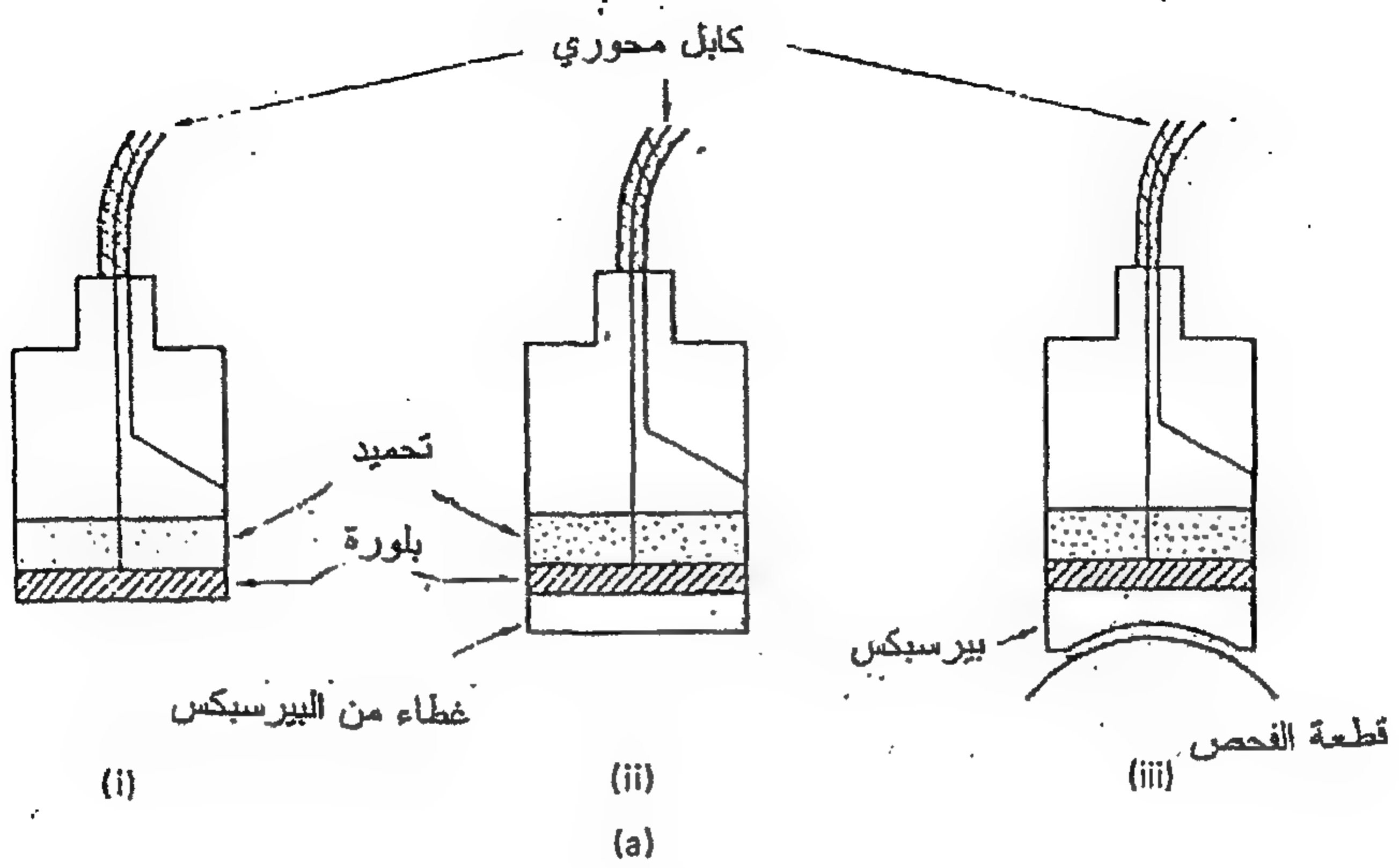
أنواع المجسات:

١- المجسات العمودية: لقد تم تصميم المجسات العمودية لتبعث موجات انضغاطية الى داخل المادة تحت الفحص وبزاوية عمودية على سطح المادة. تكون البلورات في بعض الأحيان غير مغطاه بأية مادة حيث توضع على المادة المراد فحصها بصورة مباشرة عبر غشاء رقيق من الزيت او الماء. وكبديل عن ذلك يمكن ان تغطى البلورة بطبقة المعدن او الخزف (Ceramic) او البيرسبكس (Perspex). وقد يأخذ البيرسبكس نفس انحناء الجزء المفحوص وذلك للمساعدة في إزالة غشاء الهواء عند الفحص، الشكل (53a-1).

٢- المجسات الزاوية: تُصمم المجسات الزاوية لترسل امواجاً قصية (مستعرضة) او سطحية (Rayleigh waves) الى داخل المادة المراد فحصها. ان البنية الأساس للمجسات الزاوية مشابهة لتلك التي للمجسات العمودية لكن بفرق واحد هو ان البلورة مطمورة داخل قطعة من البيرسبكس لها شكل معين يسمح للموجات بالدخول الى المادة تحت الفحص بزاوية معينة. يتم انعكاس الموجه الانضغاطية عند السطح بين البيرسبكس والمعدن. ومن المحتمل ان تعود الموجه المنعكسة هذه الى البلورة مرة ثانية لتسبب اشارات مشوشة. ولتجنب ذلك يتم وضع وسط (مادة) ماصة للأمواج في مكان محدد من المجس. أما الطريقة البديلة لتجنب ذلك هو جعل شكل قطعة البيرسبكس بصورة بحيث تجعل الموجه المنعكسة ترتد منعكسة عدة مرات حتى تضمحل طاقتها. ويمكن تحقيق ذلك لأن مادة البيرسبكس لها معامل امتصاص عالي (high absorption coefficient)، كما في الشكل (53b-1).

كشف العيوب:

تدخل الحزمة فوق السمعية الى المنتوج تحت الفحص بالإتصال المباشر بين مجس البلورة والمفتوح (الشكل 54-1). ويجب أن يكون هناك مادة وصل (الزيت عادةً كما ذكرنا) بين المجس والمفتوح او الجزء المراد فحصه لأنه حتى الغشاء الهوائى الرقيق الفاصل (أقل من 10^{-3} ملم) سوف يسبب انعكاساً كلياً للأمواج، وليس من الضروري ان يكون سطح المنتوج قد تم تشغيله، إلا أنه يجب إزالة



الشكل (53-1)

مكونات المجس (a) مجسات عمودية (i) مجس غير مغطى (ii) مجس مغطى (iii) مجس عمودي لفحص سطح منحنى (b) مجسات زاوية (i) يحتوي على مادة ماصة للصوت (ii) له شكل خاص لإضمحلال الموجه المنعكسة.



الشكل (1-54)
فحص بالأمواج فوق
السمعية لقضبان
مطروقة باستخدام
مجس الامواج
الانضغاطية.

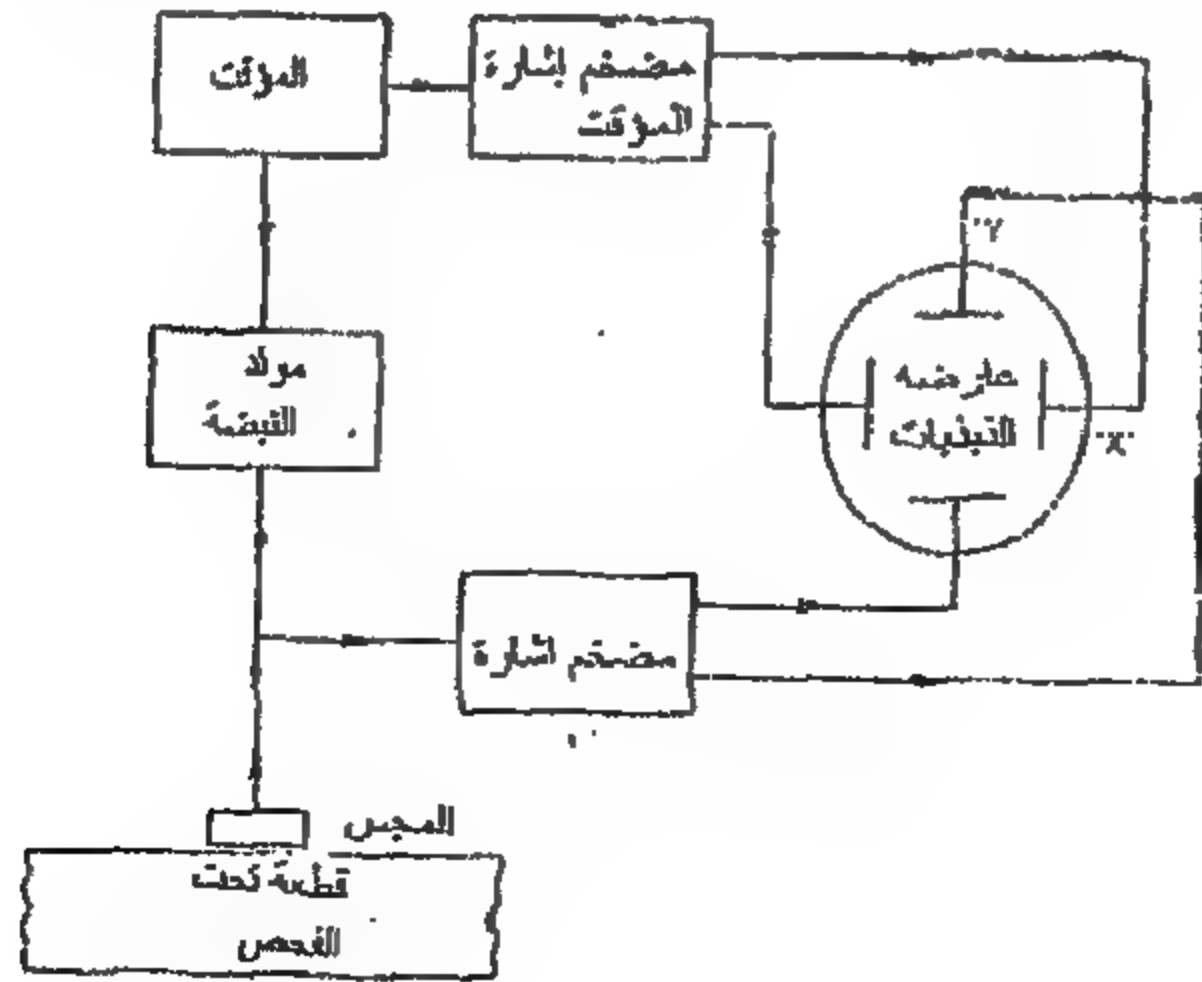
القشوره والصدأ أو أية مواد غريبة أخرى والتي يتعارض وجودها مع الإتصال المباشر للمجس مع السطح.

يمكن استخدام الأمواج فوق السمعية للكشف عن العيب بطريقتين:

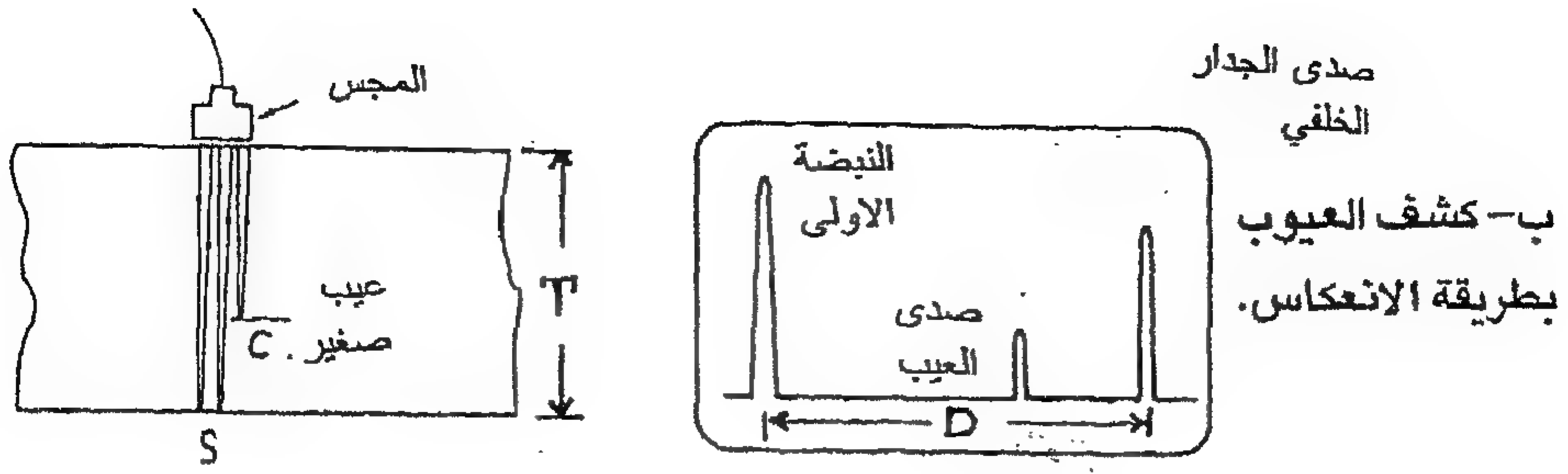
١- طريقة انعكاس النبضات Pulse - reflection method

٢- طريقة النفوذ Transmission method

١- ان طريقة إنعكاس النبضات هي الطريقة التي تستخدم في الأغلب الأعم. وفي هذه التقنية تدخل نبضات الأمواج فوق السمعية الى الجزء تحت الفحص ويقاس الزمن اللازم لوصول الإشارة النافذة الى الجدار الخلفي للجزء ورجوع الصدى المنعكس منه او من بعض العيوب الوسطية ، ولأية مادة معينة وهذا الزمن يتناسب مع طول مسار الأمواج، بحيث ان الزمن يتناسب مع المسافة. يبين الشكل (1-55) رسماً تخطيطياً لجهاز كشف العيب بالذبذبات فوق السمعية.



الشكل (1-55)
(أ) رسم تخطيطي
لجهاز كشف العيب
بالأمواج فوق
السمعية.



ان هذه الطريقة لها بعض المميزات حيث أنه يمكن قياس المسافة من العيب الى البلورة الباعثة المستلمة (transceiver) بشكل دقيق إضافة الى أن هذه القياسات يمكن أن يتم اجرائها من جانب واحد للجزء فقط. ويتم اظهار النبضات النافذة والصدى المنعكس إضافة الى قياس الفترة الزمنية بينهما باستخدام جهاز منظار ذبذبات أشعة المهبط (Cathode ray oscilloscope). ويمكن ان يعاير الجهاز مباشرة بوحدات الطول، والمسافة من سطح التماس مع المجس الى العيب يمكن أن تقرأ بالمليمترات عندئذ. ويمكن استخدام آلة التصوير (Camera) لتسجيل الأثر من جهاز منظار ذبذبات أشعة المهبط (CRO).

وهذه الطريقة موضحة في الشكل (55-1). فالمجس مربوط بجهاز تضخيم الإشارة (signal amplifier) حيث يتم تضخيم الإشارة قبل أن تعرض على منظار ذبذبات أشعة المهبط. تمر الذبذبات في المادة الخالية من العيوب تماماً، من المجس بصورة غير معاقة أثناء مرورها بالمعدن ثم تنعكس من السطح عند النقطة (S) راجعة الى المجس، والذي يعمل بدوره كمستلم (receiver) أيضاً. ويتم تسجيل كلاً من النبضة المنبعثة وصددها على منظار ذبذبات أشعة المهبط، فالمسافة (D) بين النبضات (blips) على الشاشة تتناسب مع سمك المادة تحت الفحص (T)، فإذا تواجد اي عيب، مثل الشق في (C)، فعندئذ سيعترض النبضة فوق السمعية وتنعكس راجعة الى الخلف كما مبين في الشكل (55-1). ولأن هذا الصدى يعود الى المستلم بوقت أقصر، فستظهر نبضه بينيه على شاشة منظار الذبذبات ومكانها بالنسبة الى النبضات الأخرى يشير الى بعد العيب عن السطح.

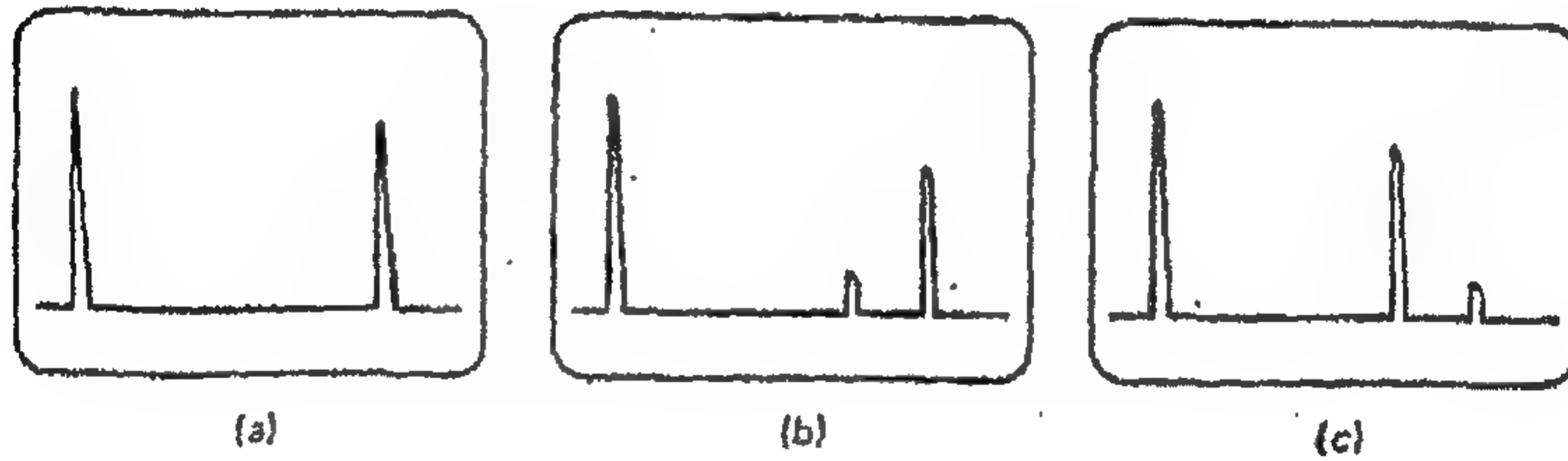
تؤثر البنية الدقيقة للمادة المراد فحصها بصورة فعّالة على الفحص . فالبنية الخشنة (coarse structure) تميل الى تشتيت الطاقة فوق السمعية وعليه فيمكن ان تخلق هذه البنية أكثر من مشكلة أثناء الفحص من نظيراتها البنية الناعمة (fine structure) .

تحديد العيوب:

يمكن بوساطة الطرائق فوق السمعية تعيين ليس فقط مكان العيوب الداخلية بالضبط وإنما يمكن أيضاً، وفي أحوال كثيرة، تمييز نوع العيب. وسيتم هنا التطرق الى مختلف أنواع الإشارات المنعكسة عن (المستلمة من) أنواع محددة من العيوب التي سيتم التنويه عنها.

أ- العيوب العمودية على اتجاه الحزمة الصوتية:

فعند عدم وجود عيب فسيتم استلام إشارة صدى كبيرة واحدة من الجدار الخلفي للجزء المفحوص. يجب أن يعطي وجود عيب صغير إشارة صدى صغيرة مع انخفاض نسبي في سعة (شدة) إشارة صدى السطح (الجدار) الخلفي . وعندما يكون حجم الغيب أكبر من قطر المجس فسيكون صدى العيب كبيراً وقد تختفي إشارة الصدى من السطح الخلفي (الشكل 1-56)، اعتماداً على عمق العيب بالنسبة لانتشار الحزمة في النقطة البعيدة.

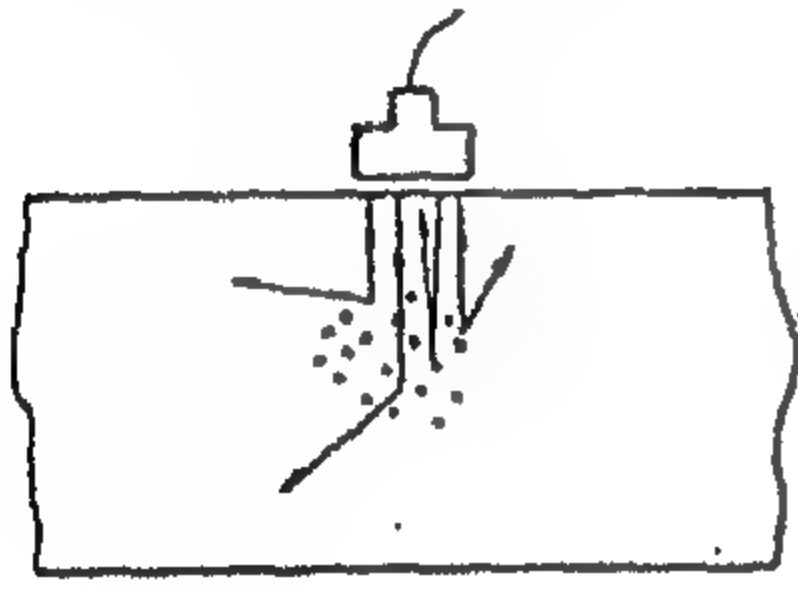


الشكل (1-56) تأثير حجم العيب في النبضات على شاشة العرض

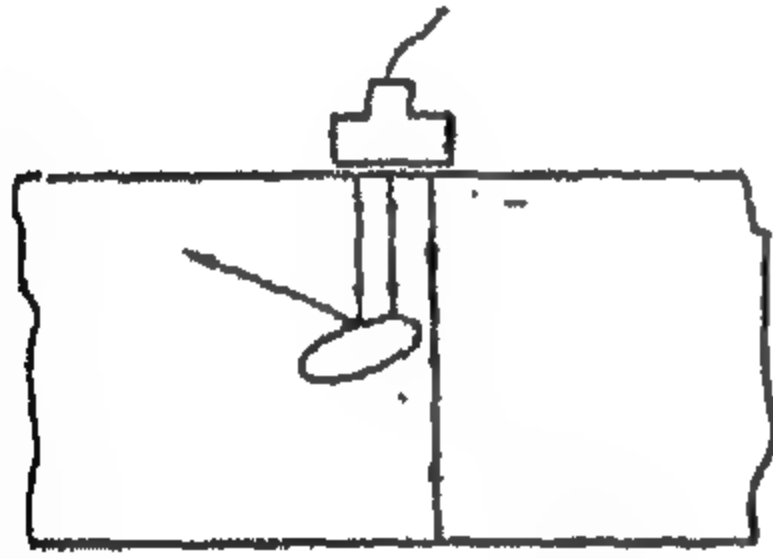
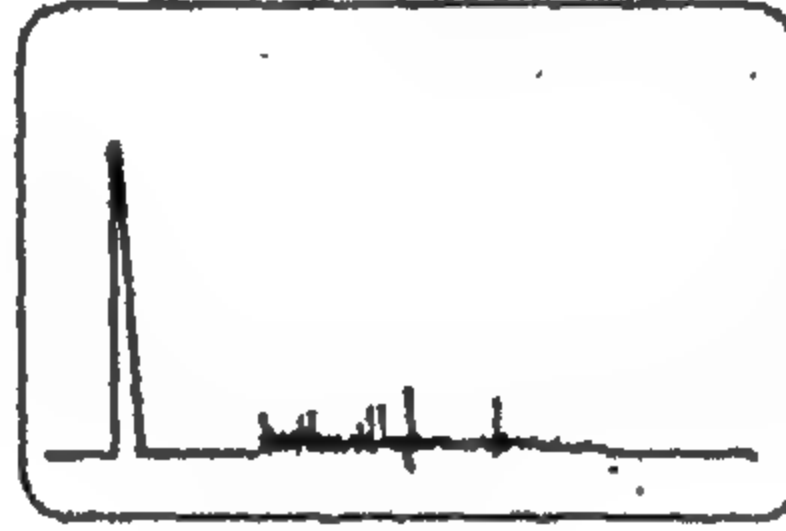
- a- من جزء خالي من العيب - تظهر النبضة الأولى والنبضة المنعكسة عن الجدار الخلفي.
- b- صدى عن عيب صغير مع صدى كبير عن الجدار الخلفي.
- c- صدى عيب كبير مع صدى صغير عن الجدار الخلفي.

ب- العيوب الأخرى غير المستوية:

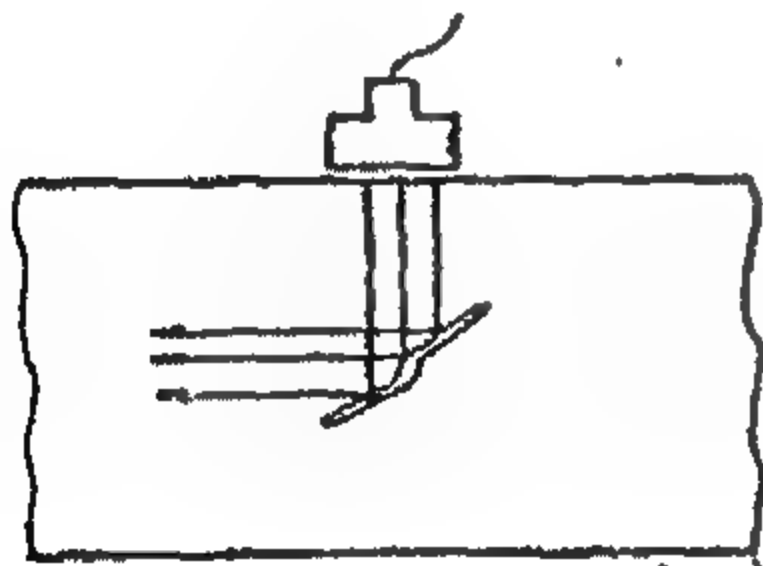
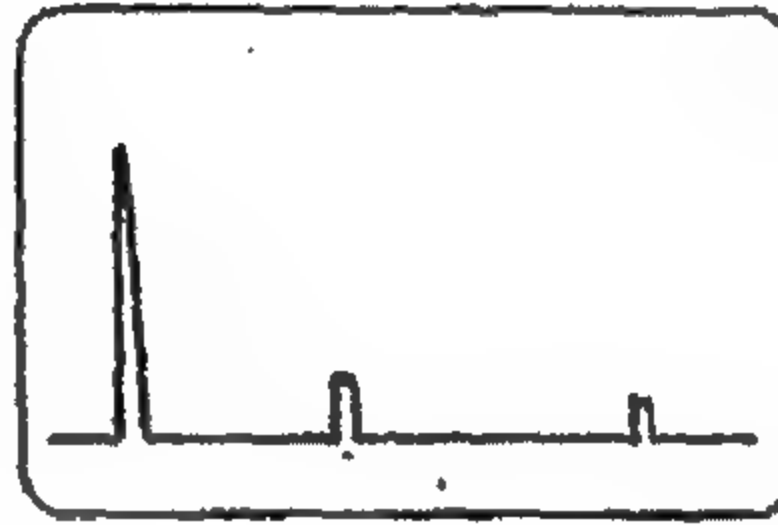
تؤدي مناطق المسامات الدقيقة إلى تشتت في الحزمة بصورة عامة معطية إشارة تشبه الحشيش (grass) على شاشة منظار ذبذبات أشعة المهبط مع فقدان إشارة صدى الجدار الخلفي كما في الشكل (57a-1). تميل الفجوة الهوائية أو الاكتنافة (inclusion) البيضوية الشكل إلى أن تعطي صدى عيب صغير مقترناً مع إشارة صدى من السطح الخلفي صغيرة أيضاً (الشكل 57b-1). وعندما لا تظهر على الشاشة أية إشارة بالمرّة فقد يكون ذلك علامة على وجود عيب مستوي مائل بزاوية غير عمودية بالنسبة لإتجاه الحزمة الصوتية (الشكل 57c-1). وهناك علامات للعيوب الأخرى لأمجال لذكرها هنا، ويمكن الرجوع إلى المصادر المتخصصة لمعرفةاها.



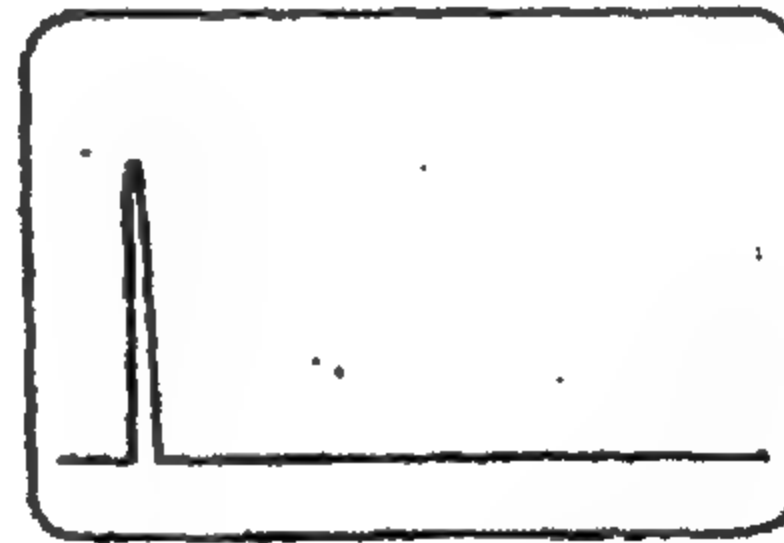
(a)



(b)



(c)



الشكل (57-1) عيوب مختلفة الأنواع مع نمط نبضاتها على الشاشة

a- مسامية دقيقة . Micro - porosity

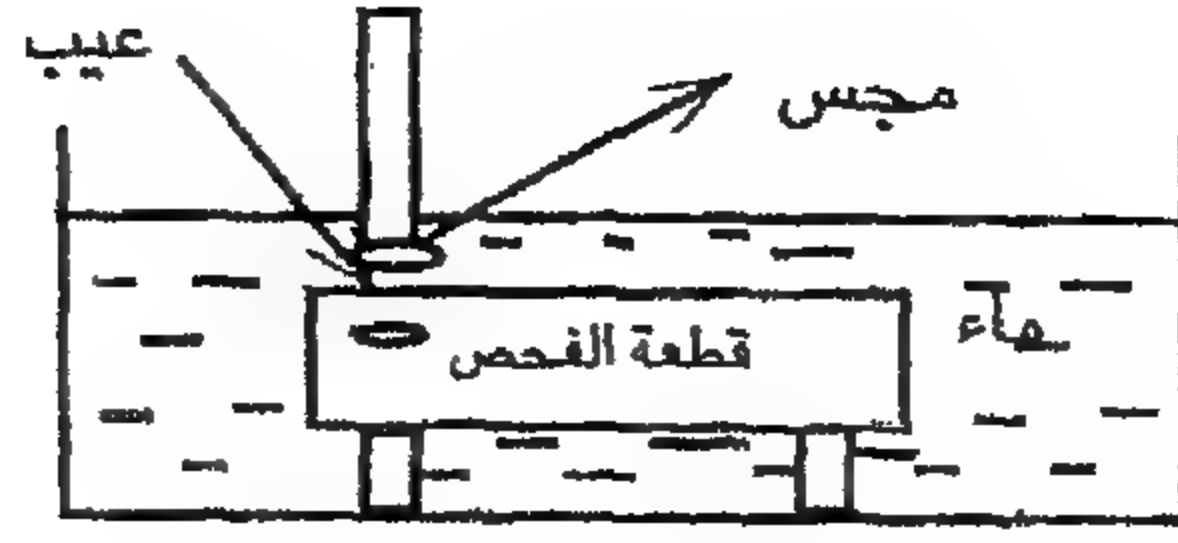
b- عيب بيضوي . Elliptical defect

c- عيب مائل . Large angled defect

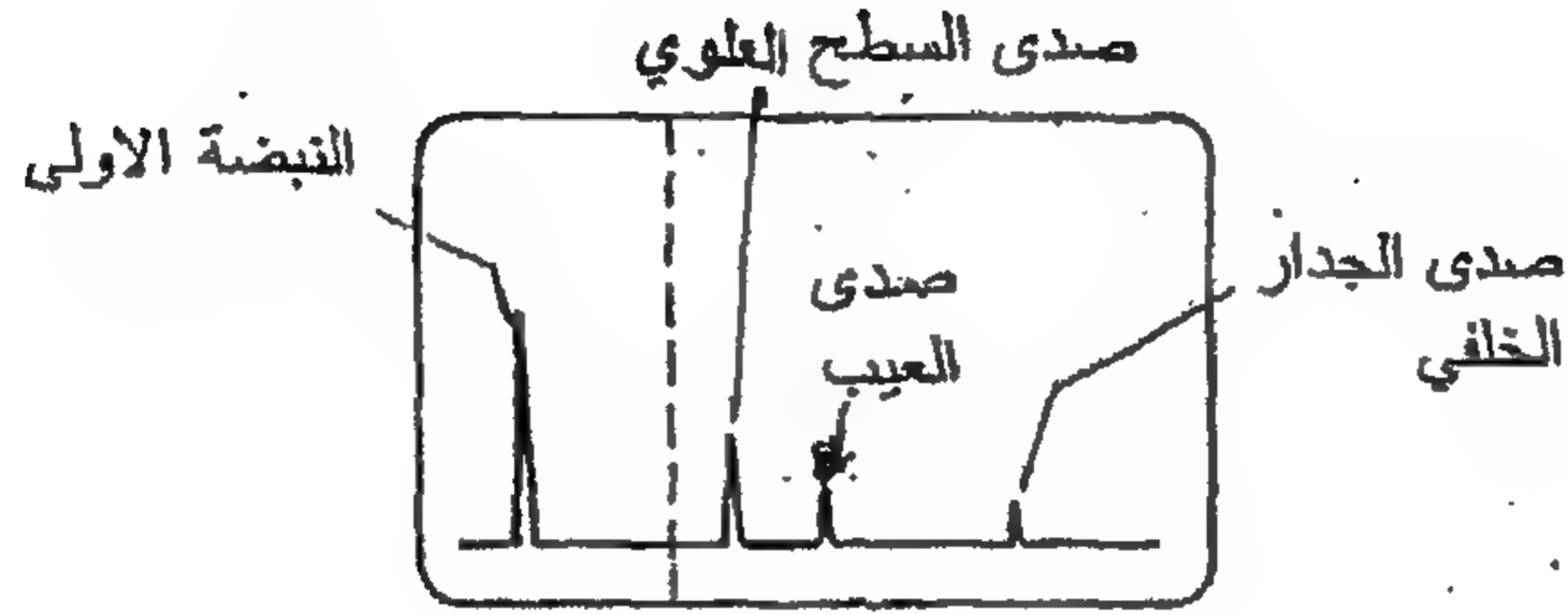
الفحص عند الغمر : Immersion testing

تُعرَف كل تقنيات الفحص التي ذكرت لحد الآن بتقنيات المسح المباشر (contact scanning) حيث تتم فيها المحافظة على المجس او المجسات في حالة تماس مباشر مع سطح المادة تحت الفحص ومن خلال غشاء رقيق من سائل الوصل (Liquid couplant) . من الممكن ايضاً استخدام جهاز المسح عند الغمر - immersion scan- ning) والتي يتم فيها غمر الجزء المراد فحصه في حوض ماء ثم يوضع المجس في الماء ايضاً فوق الجزء المراد فحصه بمسافة . تلائم تقنية الفحص هذه بصوره مثالية للأجزاء الكبيرة المعمولة والمنتھية في مصنع انتاجي ، وتكون أجهزة الفحص، في هذه الحالة، مؤتمته بصورة تامة عادةً. فعلى سبيل المثال، تستخدم هذه التقنية لفحص الألواح المعدنية قبل تشغيلها لتكون أجزاء لهيكل الطائرة وكذلك فحص أقراص التوربين الغازي وفحص عجالات الطائرات.

تظهر على شاشة جهاز منظار الذبذبات، أثناء الفحص، نبضة خاصة بالسطح بين الماء والمعدن (water / metal interface) كما تظهر نبضة الصدى من السطح الخلفي للمادة تحت الفحص ، فإن ظهرت نبضة بين هاتين النبضتين دلّ ذلك على وجود عيب في المادة المفحوصه كما مبين في الشكل (1-58) . يجب أن تضبط وتراعى المسافة بين المجس والمادة تحت الفحص بحيث أن نبضات الصدى المعاد عند السطح الفاصل بين الماء والمعدن لا تظهر (أو لا تؤخذ بالحسبان) ضمن طول محور الزمن الأساس (time base) المقابل لسماك المعدن . يمكن أن يضبط او يرتب محور الزمن الأساس بحيث تكون القمة (النبضة) الأولى، على جهة يسار شاشة العرض ، خاصة بالسطح الفاصل بين الماء والمعدن . يتم تزويد اغلب الاجهزة المؤتمته (المحوسبة) المصممة لتلائم الفحص تحت الماء بالراسم البياني (chart recorder) أو الراسمة وذلك لتسجيل أو رسم اماكن العيوب على ورقة ملائمة، وبذلك يتم الحصول على تسجيل دائم لخارطة العيوب المتواجدة في القطعة المفحوصة.



(a)



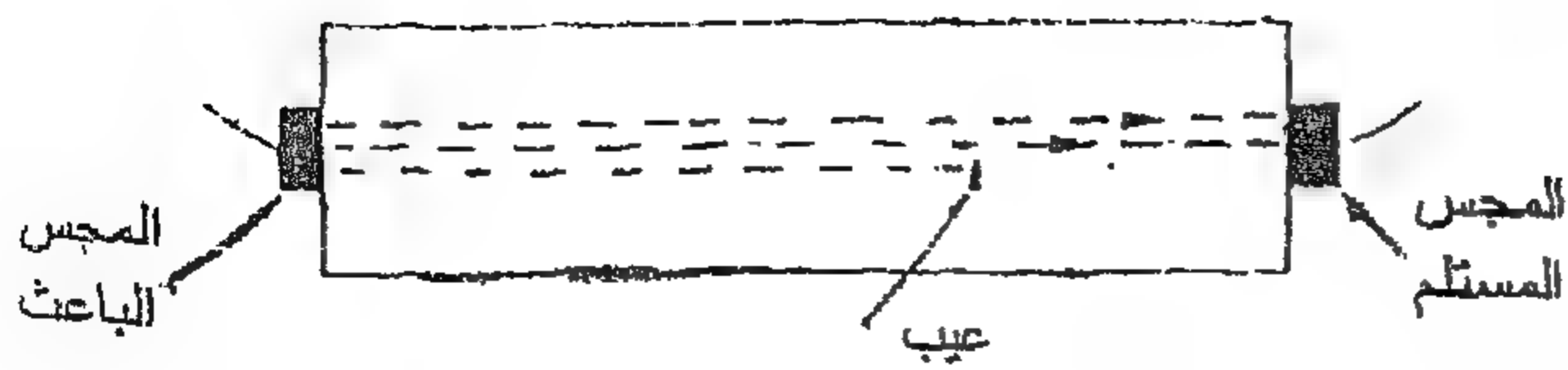
(b)

الشكل (1-58) الفحص بتقنية الغمر.

(a) وضع القطعة المراد فحصها في الماء و المجس.

(b) النبضات الظاهرة على الشاشة وتفسيرها.

٢- اما في طريقة الأمواج النافذة ، فتستخدم حزمة مستمرة من الامواج فوق السمعية . فيتم وضع مجسان على جهتين متقابلتين من الجزء المراد فحصه أحدهما وهو المرسل او الباعث (transmitter) والآخر هو المستلم (receiver) فتمر حزمة الامواج فوق السمعية من المجس الأول (الباعث) الى المجس الثاني (المستلم) كما مبين في الشكل (1-59) .



الشكل (1-59)

طريقة النفوذ في

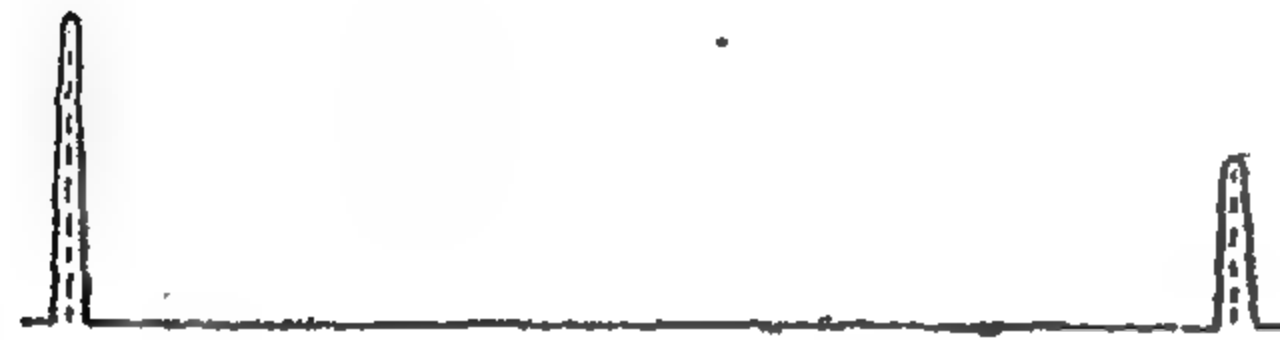
كشف العيوب

بالأمواج فوق

السمعية.



إشارة النبضة
من دون عيب



إشارة النبضة
عند وجود عيب

وفي هذه الطريقة تظهر قمتين (نبضيتين) فقط على شاشة منظار ذبذبات أشعة المهبط، الأولى من جهة اليسار تمثل القمة المنبعثة أما تلك التي على الجهة اليمنى فتمثل شدة الحزمة الواصلة إلى المجس المستلم. تظهر في حالة الجزء السليم تماماً قمتين اثنتين متساويتين في الارتفاع، إلا أنه عند وجود عيب ما، فيختزل ارتفاع القمة التي على الجهة اليمنى، لأن جزءاً من طاقة الحزمة سوف ينعكس عن الثغرة (العيب) إلى الباعث وبذلك ينحجب جزء من طاقة الموجه عن الوصول إلى المستلم.

يجب أن يكون سطحاً الجزء الموضوع عليهما المجسين متوازيين، في حالة طريقة الأمواج النافذة، لأنه في حالة وصول حزمة الأمواج فوق السمعية إلى الوجه المقابل بزاوية فسيكون هناك انكسار بالإضافة إلى الانعكاس.

ومن المفضل استخدام طريقة انعكاس النبضات للأسباب التالية:

أ- يلزمنا مجس واحد هو باعث ومستلم.

ب- يستخدم سطح واحد فقط من الجزء المراد فحصه.

ج- لا يلزم أن يكون السطح الخلفي للجزء موازياً للوجه المقابل.

تطبيقات الفحص بالأمواج فوق السمعية:

يمكن الكشف عن التصفیحات (Laminations) والثنيات (seams) وشقوق الدحو (rolling cracks) إضافة الى الاكتنافات (inclusions) في صفائح الفولاذ والقضبان المسطحة التي سمكها يتراوح بين 5 ملم الى 30 ملم. ويمكن ان يتم كشف الثغرات التي حجمها بحدود 0.5% من سمك الصفيحة بسهولة كما هي الحالة في التصفیحات التي يصل سمكها الى حد 0.0005 ملم. أما القضبان والمطروقات والمسبوكات والكتل المعدنية التي يصل قطرها حتى 1.5 متر فيمكن اختبارها للكشف عن الثغرات الانبوبية (piping) والإنكماش والتشقق وتستخدم هذ الطريقة بشكل واسع أيضاً لفحص الملحومات.

٥-١ خاتمة:

وفي ختام هذا الفصل يمكن اختصار الاستعمالات والمزايا للأنواع المختلفة من طرائق الفحص اللا اتلافي في الجدول (1-17).

جدول (1-17) استخدامات ومزايا طرائق الفحص اللا اتلافي المختلفة.

التقنية	الذبذبات فوق السمعية	الأشعة السينية	التيارات الدوامة	الدقائق المغناطيسية	السوائل المتغلغلة
الكلفة الكلية الاساسية	متوسطة الى عالية	عالية	منخفضة الى متوسطة	منخفضة جداً	منخفضة جداً
كلفة ما يستهلك	منخفضة جداً	عالية	منخفضة	متوسطة	متوسطة
النتائج	آنية	تتطلب وقت	آنية	آنية تقريباً	تتأخر قليلاً
تأثير هندسة الجزء	مهمة	مهمة	مهمة	غير مهمة عادة	غير مهمة عادة
مسألة الوصول الى الجزء	مهمة	مهمة	مهمة	مهمة	مهمة
نوع العيوب	داخلية	اغلبها	الخارجية	الخارجية	السطحية
الحساسية النسبية	عالية	متوسطة	عالية	منخفضة	منخفضة
التسجيل الاساس	غالي	قياسي	غالي	غير متعارف	غير متعارف
خبرة الفاحص	عالية	عالية	متوسطة	منخفضة	منخفضة

تكملة الجدول (1-17).....

التقنية	الذبذبات فوق السمعية	الأشعة السينية	التيارات الدوامة	الدقائق المغناطيسية	السوائل المتغلغلة
تدريب الفاحص	مهمة	مهمة	مهمة	مهمة	مهمة
الحاجة الى التدريب	عالية	عالية	متوسطة	منخفضة	منخفضة
قابلية حمل الأجهزة	عالية	منخفضة	عالية الى متوسطة	عالية الى متوسطة	عالية
التأثر بالتكوين	شديد	الى حد بعيد	شديد	المواد المغناطيسية فقط	قليل
الكيمائي	جيدة	معتدلة	جيده	معتدلة	معتدلة
القابلية على الأتمته	قياس السمك	قياس	قياس السمك	كشف	كشف العيوب
لها القدرة كذلك على	والى حد ما	السمك	وتصنيف المواد	العيوب فقط	فقط
	التكوين الكيمائي				

تمارين الفصل الأول

- ١- ماهي طبيعة وأنواع العيوب في المواد وعلى أي أساس يعتمد قبول الجزء المنتج أو رفضه؟
- ٢- عرف الفحوصات اللاأتلافية والأتلافية وأضرب أمثلة على ذلك.
- ٣- عدد طرائق الفحص اللاأتلافي للملائمة للعيوب السطحية وأشرح واحدة منها.
- ٤- ماهي طرائق توليد المجال المغناطيسي بأنواعه، وكيف يمكن التمييز في بعض الأحيان بين العيوب السطحية وتحت السطحية في الفحص بتقنية الدقائق المغناطيسية؟
- ٥- كيف تزال المغناطيسية المتخلفة في الجزء المفحوص بتقنية الدقائق المغناطيسية.
- ٦- ماهو مصدر الأشعة السينية وأشعة كاما والنيوترونات المستخدمة في تقنية الفحص الشعاعي؟
- ٧- ما هو الفرق بين أشعة كاما والأشعة السينية؟
- ٨- لماذا يجب الاحتراس أكثر وبصورة دائمة من مصادر أشعة كاما؟
- ٩- على أي أساس يعتمد الفحص الشعاعي بصورة عامة.
- ١٠- كيف يتم توليد الذبذبات فوق السمعية المستخدمة في الفحوصات اللاأتلافية؟
- ١١- بماذا تمتاز تقنية الفحص بالأمواج فوق السمعية بطريقة الانعكاس (الصدى) على طريقة النفوذ؟
- ١٢- على أي أسس يتم اختيار التردد الملائم عند الفحص بتقنية الذبذبات فوق السمعية، أعط مثلاً على ذلك.

١٣- هل يمكن استخدام التيار المباشر (DC) لتوليد التيارات الدوامية ولماذا؟

١٤- الى اي مدى تتغلغل التيارات الدوامية تحت سطح الجزء المفحوص وعلى اي العوامل تعتمد هذه المسافة. وماهي محدوديات ومزايا الفحص بالتيارات الدوامية؟

١٥- ماهي الغاية من الفحوصات اللاأتلافية؟

الفصل الثاني

طرائق قياس درجات الحرارة

٢-١ المقدمة:

قد يُعتقد للوهلة الأولى ان قياس درجات الحرارة شيء سهل وميسور، والواقع هو خلاف ذلك فلمعرفة درجة الحرارة المضبوطة يجب معرفة أولاً في اي مدى تقع درجة الحرارة هذه وبأية دقة يراد القياس وذلك لإختيار التقنية المناسبة للقياس . جاءت أهمية تحديد درجة الحرارة المضبوطة في حقل هندسة المعادن ، عل سبيل المثال، لتأثيرها على خواص المواد المعدنية.

ان معظم العمليات الميتالورجية تتضمن معاملة المعدن او السبيكة عند درجات حرارية عالية نسبياً، إضافة الى ضرورة السيطرة وبصوره مضبوطة على درجة الحرارة للحصول على الخواص المثلى في العديد من السبائك . فيمثل قياس درجات الحرارة العالية او البايرومترى (Pyrometry) أحد أهم فروع تقنيات هندسة المعادن .

٢-٢ مقاييس درجات الحرارة:

كانت تستخدم في الماضي ثلاث مقاييس لدرجات الحرارة . وقد تم أخذ الماء كمعيار لذلك، باعتباره الأكثر وفرة في الطبيعة. هذه المقاييس هي:

أ- المقياس المئوي (celsius) وهو مقسم الى مئة تقسيم حيث تم اعتبار درجة تجمد الماء المقطر فيه هي الصفر ودرجة غليانه هي مئة.

وهذا المقياس كان مستخدماً في أغلب دول العالم عدا انكلترا وأمريكا، ووحداته هي درجة مئوية (م°).

ب- المقياس الفهرنهايتي (Fahrenheit) وفيه تعتبر درجة تجمد الماء، المقطر 32 ودرجة غليانه 212 ، وقد كان سائداً في أمريكا و انكلترا ، ووحداته هي درجة فهرنهايتيه.

ج- المقياس المطلق او الأساس (Absolute) وهو المقياس المعتمد على القانون الثاني في الثرموديناميك (الديناميك الحرارية) عند تطبيقه على الغاز المثالي. ووحداته هي الكلفن (Kelvin) "K". لهذا المقياس نفس تقسيمات المقياس المئوي اي ان هناك مئة تقسيم من نقطة تجمد الماء الى غليانه تحت الظروف القياسية. تقابل نقطة تجمد الماء (الصفر المئوي 0°C) الى 273 مطلقة في حين تقابل نقطة غليانه 373K في النظام المطلق. لذلك كان الصفر المطلق مساوياً الى 273°C - وهي اصغر درجة ممكن تصورها.

أما الآن وحسب نظام الوحدات العالمي (SI units) فإنه لايجوز استخدام مقياس الفهرنهايت. وقد أخذ النظام المطلق لقياس درجات الحرارة كقياس نظامي عالمي. كما أجاز النظام الدولي للوحدات استخدام النظام المئوي جنباً الى جنب مع مقياس درجات الحرارة المطلقة وذلك للعلاقة البسيطة بينهما وهي أن درجة الحرارة المطلقة (X) تساوي درجة الحرارة المئوية (°C) + 273 .

٢-٣ قانون الغازات العام:

. ينص هذا القانون رياضياً على أن

$$PV = RT \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

حيث يمثل:

P: ضغط الغاز.

V: حجمه .

R: ثابت الغازات العام (8.31 J/mole.K)

T: درجة حرارة الغاز المطلقة.

يتحقق قانون الغازات اعلاه في حالة «الغاز المثالي» وحيث أنه لا يوجد غازات

مثالية من هذه الناحية فيمكن عملياً استخدام غاز الهيدروجين أو النيتروجين لأن مقدار انحرافهما عن الغاز المثالي معروف لذا يمكن اجراء التصحيح الملائم عند ذلك . فيمكن استخدام الجهاز المسمى محرار غاز الحجم الثابت لقياس درجات الحرارة وبتطبيق قانون الغازات. والجهاز متكون من كره مقاومة لدرجات الحراره تحتوي على غاز الهيدروجين او النيتروجين. وعندما ترتفع درجة الحرارة يبدأ الغاز بالتمدد، فإذا تم منعه من التمدد (وذلك بتثبيت حجمه) فيزداد ضغطه . تقاس هذه الزيادة في الضغط . وحيث ان الضغط يتناسب طردياً مع درجة الحرارة لذا يمكن قياس درجة الحرارة بهذه التقنية .

وبالرغم من ان محرار غاز الحجم الثابت جهاز قياس أساسي لدرجات الحرارة إلا أنه ضخم نسبياً وقابل للكسر وغير ملائم تماماً لقياس درجات الحرارة في العمليات الميتالورجية الروتينية، كالمعاملات الحرارية والدحو على الحار (hot rolling) وغيرها . ومع ذلك فقد تم استخدامه لقياس درجات انصهار العديد من المعادن النقية والمركبات . وقد اعتبرت هذه الدرجات قياسية لأنها مقادير ثابتة لا تتغير عند تكرار قياسها، ولذلك اتخذت لمعايرة الكثير من أجهزة قياس درجات الحرارة (Pyrometers) وبصوره ملائمة . يبين الجدول (1-2) الدرجات القياسية المستخدمة غالباً .

جدول (1-2) درجات انجماد بعض المواد النقية بالقياس المئوي

المادة	الرمز الكيماوي	درجة الانجماد (°C)
الزئبق	Hg	-38.9
القصدير	Sn	231.8
الرصاص	Pb	327.3
الخارصين	Zn	419.4
الانتيمون	Sb	630.5
كلوريد الصوديوم	NaCl	801.0
الفضة	Ag	960.5
النحاس	Cu	1083.0
البلاديوم	Pd	1555.0
التنكستن	W	3400.0

وعليه يمكن استخدام الدرجات اعلاه لمعايرة أغلب أجهزة درجات الحرارة كالمحاريير (thermometers) والمزدوجات الحرارية (thermocouples).

٢-٤ المحاريير:

تعتمد أجهزة قياس درجات الحرارة بشكل عام على تغير أحد الخواص الفيزيائية مع درجة الحرارة وبصوره خطية في الغالب كتمدد المادة او تغير مقاومتها الكهربائية او تغير لونها وغير ذلك من الخواص.

وبناءً على ذلك يمكن استخدام عمود من الزئبق أو أي سائل ملائم (كالكحول) لهذا الغرض. وقد تم تصنيع المحرار الزئبقي لقياس درجات الحرارة. يتكون المحرار الزئبقي من أنبوب زجاجي شعري مستقيم مغلق وفي أسفله خزان صغير يحتوي على قليل من الزئبق يسمى بصلة المحرار. وقد تم تدريج المحرار بشكل خطي حيث جعلت درجة تجمد الماء المقطر مساوية للصفر (في القياس المئوي) ودرجة غليانه مساوية الى مئة درجة.

وبما أن تمدد الزئبق يتناسب طردياً مع ارتفاع درجة الحرارة كالاتي:

$$L=L_0(1+\alpha t). \quad \dots\dots\dots(2-2)$$

حيث أن:

L : طول عمود الزئبق عند درجة الحرارة $t(^{\circ}C)$

L_0 : طول عمود الزئبق عند الصفر المئوي

α - معامل التمدد الحراري الخطي للزئبق $(^{\circ}C^{-1})$

يمكن استخدام المحرار الزئبقي الى حد حوالي $350^{\circ}C$. أن استخدامه محدود في العمليات الميتالورجية، كما أن اقل درجة يمكن قرائتها فيه هي درجة تجمد الزئبق ($-38.9^{\circ}C$) او اعلى بقليل. يمكن رفع الحد الأعلى فيه الى $550^{\circ}C$ وذلك بملء القسم العلوي من الساق الزجاجية بغاز النيتروجين المضغوط، ومع ذلك لا يزال هذا الحد من درجات الحرارة اقل من المطلوب بصورة عامة كما أنه قابل للكسر وغالي نسبياً.

٥-٢ الأعلام والمؤشرات الصبغية:

لهذه المواد استخدامات خاصة، على سبيل المثال، عندما تتم معاملة بعض الأجزاء الفولاذية حرارياً، تتغير ألوان الأعلام أو الصبغات هذه أو هيئتها عند درجات حرارية معلومة. فتوضع علامة على جزء ما ثم يتم التسخين حتى يحصل تغيير في لون العلامة أو هيئتها.

ومن فوائد هذه المؤشرات ضمان وصول الجزء إلى الدرجة الحرارية المطلوبة وليس مجرد ما تشير إليه قراءة المقياس الموجود في الفرن على سبيل المثال، من درجة حرارية كما هو عليه في كل الأفران فقد تختلف درجة الجزء المسخن عن درجة الحرارة التي يسجلها المقياس. كما أن هذه الطريقة مفيدة عند تعيين درجة الحرارة في الجزء المسخن موضعياً، كما في حالة التسخين الذي يسبق اللحام أو حني الأنابيب وفي إزالة الاجهادات موضعياً.

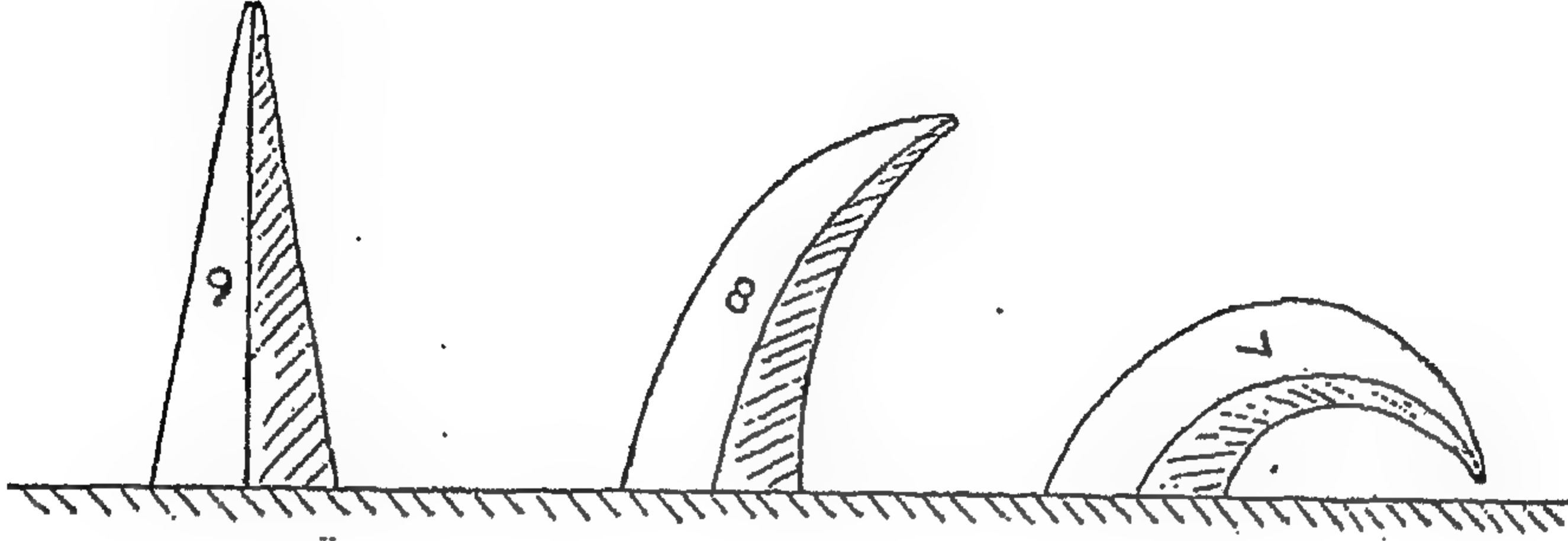
٦-٢ الكرويات والمخاريط المؤشرة:

إن ما يعرف بمخاريط سيجر (Seeger cones) هي عبارة عن أهرام مثلثة القاعدة تصنع من مخاليط متنوعة من الكاؤولين والفلسبار والكوارتز والمغنيسيا والكلس وأوكسيد الحديد وحامض البوريك ثم يتم ضبط التكوين الكيماوي لكل هرم بحيث أنه يذوي وأخيراً ينهار عند درجة حرارة معينة.

تستخدم عدد من هذه المخاريط التي لها درجات انصهار مختلفة بحيث تمثل مدى من درجات الحرارة تقع ضمنه الدرجة المقدرة حيث توضع على لوح أو بلاطة مسطحة وفي مكان ملائم يمكن مشاهدته. حيث يكون المعيار لدرجة الحرارة في النهاية هو انحناء رأس الهرم ومن ثم يلامس الأرضية الموضوع عليها نتيجة لبلوغه هذه الدرجة. كما مبين في الشكل (1-2).

يمكن يتم تقدير درجة الواقعة بين 600 و 2000 °C مثوي بهذه الطريقة. والمواخذه الأساسية عند استخدام مخاريط سيجر هي أن نهاية المخاريط تتأثر بمعدل التسخين وطبيعة جو الفرن.

تستخدم الكريات الكاشفة لدرجات الحرارة الأعلى من 900°C وتذوب بصورة مفاجئة عند الدرجة المحددة وبخطأ لا يتجاوز $\pm 1\%$.



الشكل (1-2)

مخاريط سيجر، يشير الهرم ذو الرقم 7 الى الدرجة الصحيحة.

٧-٢ أجهزة قياس درجات الحرارة بالمقاومة الكهربائية

(Electrical Resistance pyrometers)

تبنى هذه الاجهزة على حقيقة كون المقاومة الكهربائية لسلك معدني تزداد بزيادة درجة الحرارة. والمعدن المستخدم بصفة عامة هو البلاتين وعلى هيئة سلك رفيع ملفوف على قطعة ملائمة الشكل من الميكا (mica) حيث توضع المجموعة في انبوبة مقاومة لدرجات الحرارة العالية. يستخدم هذا الجهاز كمحرار لقياس درجة الحرارة حتى 600°C :

أما العلاقة بين درجة الحرارة والمقاومة فهي:

$$R_t = R_0(1 + \beta t) \quad \dots\dots\dots(3-2)$$

R_t : مقاومة السلك عند درجة t مئوية.

R_0 : مقاومة السلك عند درجة الصفر المئوي.

β : معامل درجة الحرارة للمقاومة الكهربائية ($^{\circ}C^{-1}$) وهو ثابت لكل مادة.

تشذ المعادلة (2-3) عند الدرجات العالية. والعلاقة الدقيقة بين الصفر و $600^{\circ}C$ هي:

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2) \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

حيث أن:

a و b ثابتان يتعلقان بمحرار المقاومة الكهربائية البلاتيني ذاته:

يتم تعيين التغيير في المقاومة بواسطة دائرة كهربائية من نوع قنطرة وتستون (wheatstone - bridge) اما درجة الحرارة فتحدد من جدول قياسي معد مسبقاً او بموجب المعادلة (2-3) بعد معرفة قيمة (β) والتي يمكن استخراجها عملياً باستخدام بعض الدرجات الحرارية القياسية المذكورة في الجدول (2-1).

وبالرغم من أن محرار مقاومة سلك البلاتين يعطي قياسات حرارية مضبوطة الا أنه نادراً ما يستخدم في الصناعة وذلك لكبر حجمه أولاً ولأنه قابل للكسر من الناحية الثانية. هذا اضافة الى أن خواص السلك تتأثر بفعل الغازات المختزلة في جو الفرن حيث انها قد تذوب في السلك . ولذلك فهو يستخدم بالأساس في أجهزة قياسية لمعايرة أجهزة قياس درجات الحرارة الأخرى.

٨-٢ متحسسات الحرارة (الثرمستور): Thermistors

وهي نوع معين من المقاومات الكهربائية والتي تستحق شرحاً خاصاً بها. وهي على أنواع وأشكال مختلفة، الشكل (2-2).

فالثرمستور مقاومة كهربائية حساسة لدرجات الحرارة لأنها يمكن ان تكشف التغيرات الطفيفة في درجات الحرارة، حيث تستخدم في كثير من الأحيان كمفاتيح أمان (Safty switches). جاء استخدام الثرمستور بصورة واسعة في الدوائر الالكترونية في أجهزة التبريد والتدفئة، اشتق اسم الثرمستور من الكلمتين المقاومة

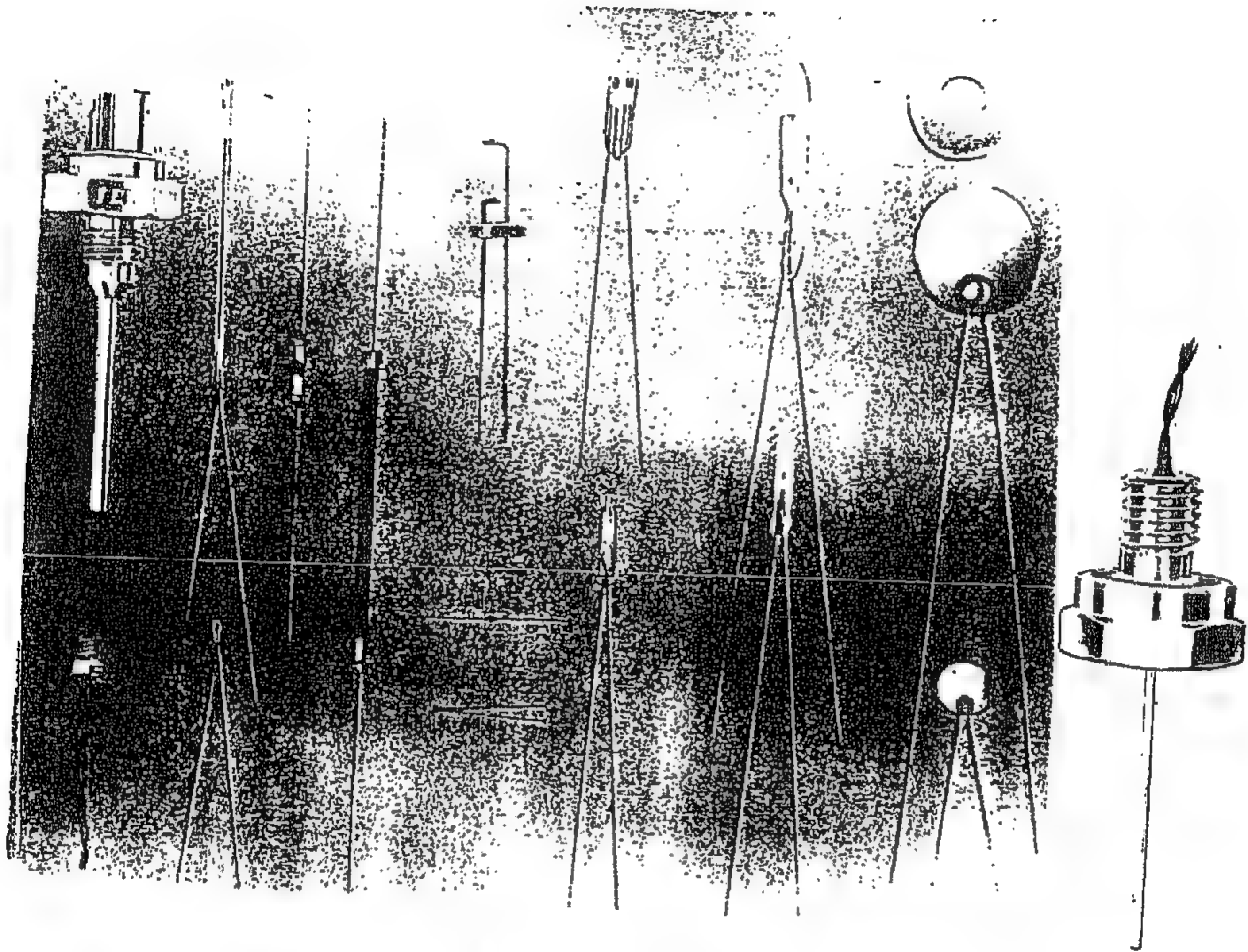
الحرارية THERMally resISTOR أي جزء من بداية كلمة الحرارية وجزء من نهاية كلمة مقاومة فصارت (Thermistor) .

تختلف أغلب الثرميستورات عن المقاومة الكهربائية المألوفة بكيفية تفاعلها مع تغير درجات الحرارة. فالمقاومة الكهربائية تبتدئ بالسخونة عندما تبدأ الإلكترونات بالجريان في الدائرة. وعندما ترتفع درجة الحرارة، تزداد المقاومة لتقل من مقدار الإلكترونات المتحركة بحيث أنها يمكن أن تبرد الى حد ما. وعلى النقيض من ذلك فإن الثرميستور لها تفاعل معاكس ، فعندما ترتفع درجة الحرارة فالمقاومة ستنخفض. وكما ذكر للتو فإن غالبية الثرميستور تتفاعل بهذه الطريقة، أما الباقي منها فتتصرف تماماً مثل المقاومات الكهربائية الاعتيادية.

هناك في الواقع نوعين مختلفين من الثرميستور هما النوع الذي له معامل درجة حرارة سالب (negative temperature coefficient) (NTC) ونوع له معامل درجة حرارة موجب (Positive temperature coefficient) (PTC). تقل مقاومة النوع (NTC) كلما زادت درجة الحرارة. أما النوع (PTC) فتصرفه يشبه تصرف المقاومات المألوفة اي تزداد مقاومته مع ازدياد درجة الحرارة.

وحيث ان الثرميستورات لها هذه القابلية الخاصة للتفاعل مع تغير درجة الحرارة فهي تستخدم لقياس درجات الحرارة و للمحافظة على المحركات الكهربائية (Electric motors) من الإفراط في التسخين ولتحسس مستويات السوائل او تستخدم كمفاتيح امان في منبهات انذار الحريق او التجمد (Fire or Frost alarm). ان تطبيقات انذار التجمد مهم جداً للذين يعنون بخطر التجمد على الفواكه والخضر. فإن التجمد القاتل يمكن ان يتلف ما قيمته الآلاف من الدنانير من الطعام في مدى ليلة واحدة فقط. تستخدم الثرميستور لان لها القدرة على كشف الفروقات الطفيفة في درجات الحرارة.

للثرميستور نهايتين (قطبين) الشكل (2-3) في اغلب الحالات بحيث يمكن ربطها في الدائرة بنفس طريقة ربط المقاومات الكهربائية.



الشكل 2-2:

أنواع وأشكال مختلفة من الترميستور. وبما انها تتحسس التغير الطفيف في درجة الحرارة. فتستخدم في احيان كثيرة كمفاتيح امان (Safty switches)

الشكل 2-3:

للترميستور بصورة عامة نهايتين او قطبيين للإستخدام في ربط هذا النوع من المقاومة في الدائرة.

٩-٢ أجهزة القياس الكهربائية الحرارية Thermoelectric pyrometers

عند ربط سلكين مختلفين في التكوين الكيماوي الى بعضهما من طرف واحد وأبقاء الطرفين الآخرين حرّين (منفصلين) فعند تسخين نقطة الربط (النقطة الحارة hot junction) الى درجة اعلى من الطرفين الحارين (النقطة الباردة cold junction) فإن قوة دافعة كهربائية (electromotive force "emf") سوف تتولد في الدائرة اي عند الطرفين الحارين . تعرف هذه الظاهرة بظاهرة بيلتر - تومسن - (Peltier - Thomson effect) . ويمكن قياس القوة الدافعة الكهربائية المتكونة بسبب الفرق بين درجتى حرارة النقطة الباردة والنقطة الحارة بأي جهاز حساس لفروق الجهد القليلة . فعند ربط ميلي فولتميتر حساس (Sensitive millivoltmeter) ، مثلاً الى الطرفين المنفصلين (النقطة الباردة) يمكن تعيين القوة الدافعة الكهربائية (emf) المتولدة . وقد وجد ان القوة الدافعة الكهربائية تزداد بزيادة الفرق بين درجتى حرارة النقطة الحارة والنقطة الباردة وعلى الصورة الرياضية التالية:

$$emf = a + bt + ct^2 + \dots \quad (5-2)$$

حيث تمثل:

emf القوة الدافعة الكهربائية، t ، درجة الحرارة عندما تكون درجة النقطة الباردة صفراً. a و b و c ثوابت خاصة بمعدني السلكين المستخدميين.

يمكن استخراج قيم الثوابت الثلاثة a و b و c باستخدام درجات حرارة قياسية كالتي في الجدول (2-1) وتطبيق المعادلة (2-5) لثلاث درجات ومن ثم استخراج قيم الثوابت الخاصة بذيتك السلكين. يدعى هذا الجهاز بالمزدوج الحراري (Thermo-couple) وهو الأساس لأغلب أجهزة قياس درجات الحرارة المستخدمة في الصناعة.

ان أهم أجزاء المزدوج الحراري هي:

أ- سلكان غير متشابهان كيميائياً إلا أن لهما تكوين كيميائي ملائم ومتجانس وذلك لتوليد قوة دافعة كهربائية كبيرة نسبياً بحيث يمكن التحسس بها بسهولة كما يمكن استخدامها لقياس أعلى درجة حرارية مطلوبة من دون ان ينصهر أو يتأكسد أحدهما أو كليهما أو تتقلب القوة الدافعة الكهربائية المتولدة.

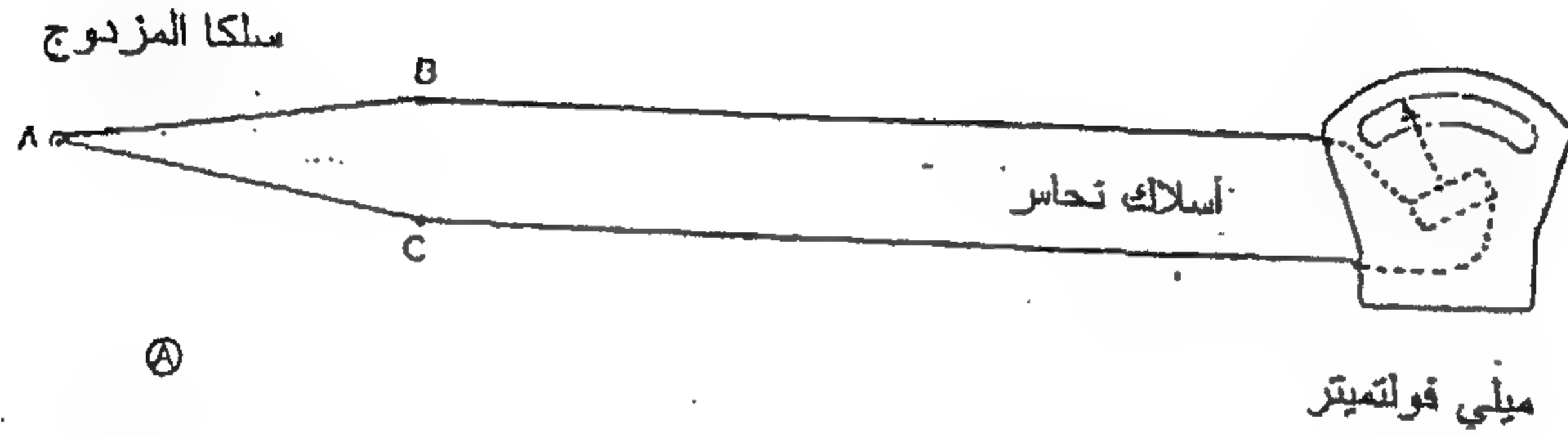
ب- مادة عازلة مقاومة لدرجات الحرارة العالية، وذلك لعزل السلكين عن بعضهما عدا عند النقطة الحارة بالطبع.

ج- غلاف مقاوم لدرجات الحرارة العالية لحماية السلكين من التآكل الكيميائي و التفاعل مع الغازات الحارة.

د- ميلي فولتمتر ملائم أو مقياس الجهد.

ان معظم اسلاك المزدوجات الحرارية غالية نسبياً وحيث أن من الضروري في الغالب وضع الميلي فولتمتر بعيداً الى حد ما عن الفرن، المراد قياس درجة حرارته، لذلك كان لزاماً علينا ان نوصل سلكي المزدوج مع الميلي فولتمتر بوساطة أسلاك توصيل أرخص ثمتاً. ولو فرض انه تم ربط الطرفين المنفصلين (B,C) بسلكين نحاسيين ليربطا الى الميلي فولتمتر الشكل (2-4). وحيث ان (B,C) قريبتان من الفرن عادة فإنهما سيكونان نقطتا ربط بين سلكين مختلفين في التكوين الكيميائي ولذا سوف يمثلان نقطتان لمزدوجين حراريين جديدين اي انه ستولد قوة دافعة كهربائية على كل منهما. وبناء على ذلك فإن الميلي فولتمتر سوف يقيس مقدار الجهد الاجمالي وليس القوة الدافعة الكهربائية للنقطة الحارة A فقط. وحيث ان درجة الحرارة للنقطتين (B,C) القريبتين من الفرن قد تتغير بصورة ملحوظة، اي

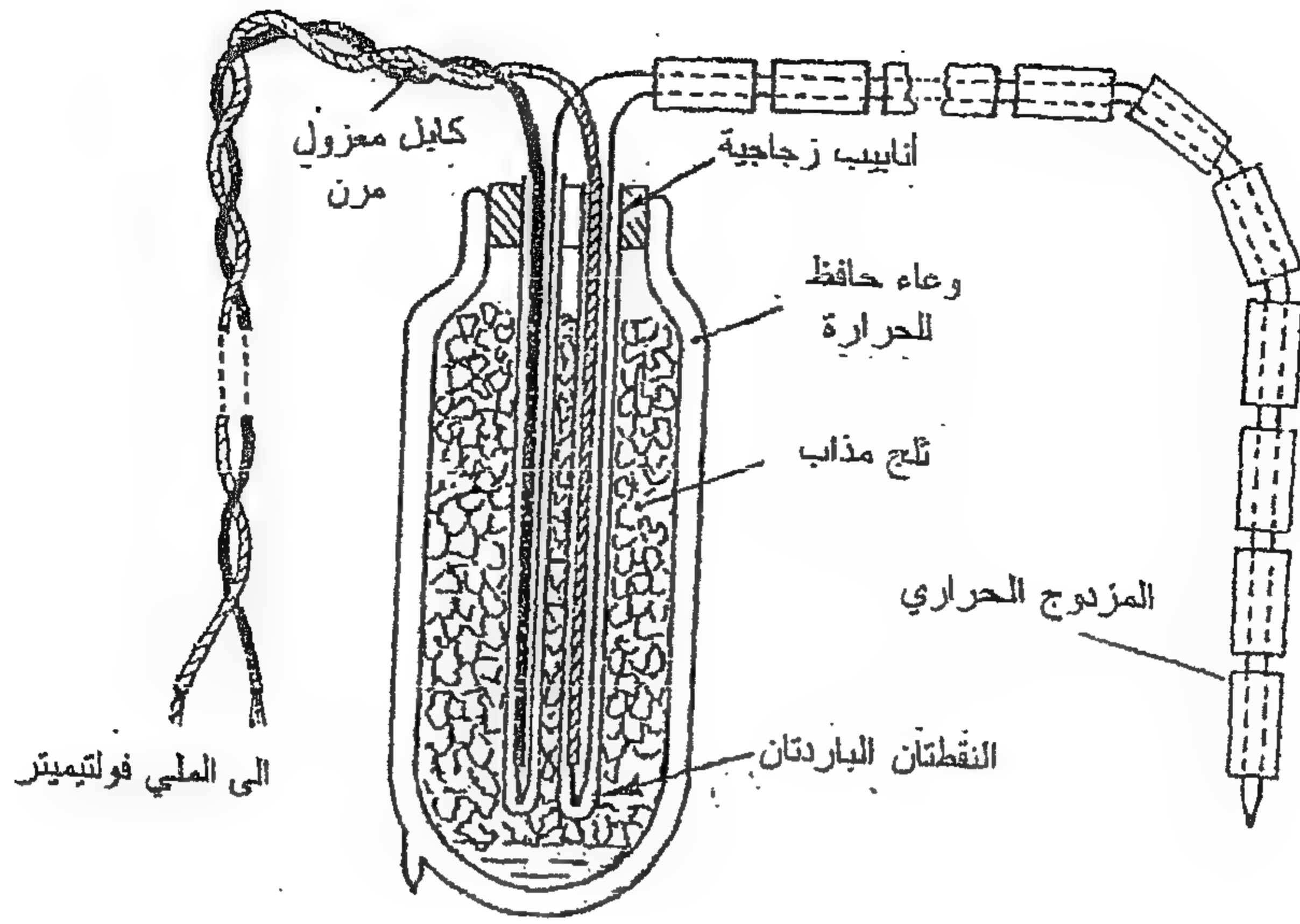
تتولد قوة دافعة كهربائية متغيرة نتيجة لذلك، ولذا تتغير القوة الدافعة الكهربائية او الاجمالية للدائرة . تؤدي هذه التأثيرات الى أخطاء غير معروفة في درجة الحرارة المسجلة.



الشكل (4-2) المزدوج الحراري مربوط من طرفي النقطة الباردة B و C بالملي فولتمتر بسلكين من النحاس.

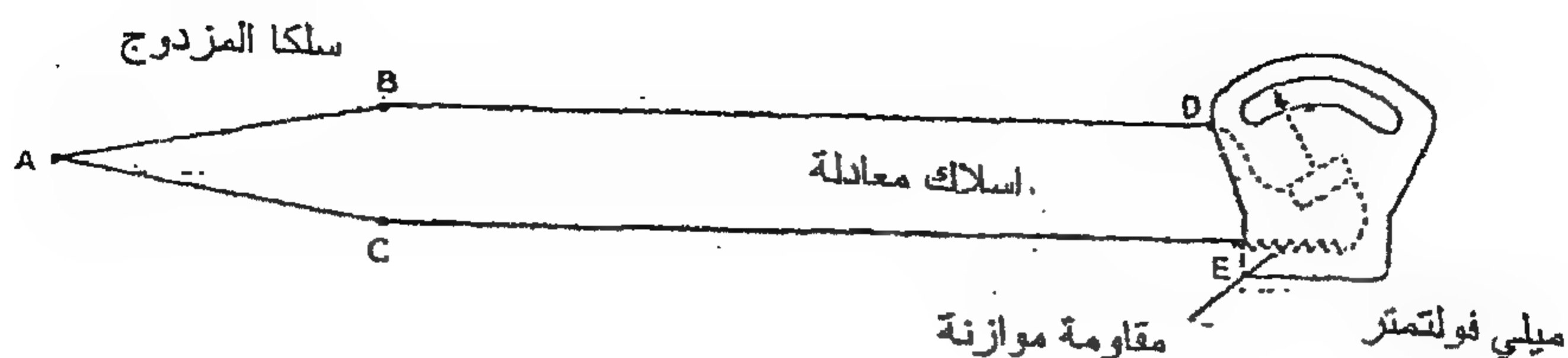
يمكن التغلب على التأثيرات المتغيرة للنقطتين B و C بطريقتين:

١- يتم جعل درجة حرارة النقطتين B و C ثابتة سواء خلال معايرة المزدوج الحراري او استخدامه. ويمكن تحقيق ذلك في المختبر بسهولة وذلك بغمر النقطتين في وعاء حافظ للحرارة (ترمس) يحتوي على مزيج من ثلج وماء مقطر، الشكل (5-2). وبذلك انطبق اصطلاح النقاط الباردة B و C . وليس من الملائم في الواقع تطبيق هذا الشيء في الصناعة وبدلاً من ذلك يُصار الى طمر النقطتين B و C الى عمق أوطء من 3m تحت الأرض حيث تكون درجة الحرارة في باطن الأرض ثابتة على مدار السنة، إلا أن هذه الطريقة مكلفة حيث تتطلب ثلاثة امتار اضافية او أكثر من أسلاك المزدوج الحراري.



الشكل (5-2) طريقة لضمان ثبوت درجة حرارة النقطة الباردة لمزدوج حراري في المختبر

٢- باستخدام اسلاك توصيل معادلة (Compensating Leads) ، فهناك أسلاك تستخدم كأزواج حيث ان لها ثوابت كهروحرارية (Thermoelectrical constants) مشابهة لثوابت أسلاك المزدوج الحراري نفسه. ويكون أحد الأسلاك من النحاس عادةً أما الآخر فمن سبيكة ملائمة من النحاس والنيكل والتي تولد عند استخدامها مع سلك النحاس قوة دافعة كهربائية مشابهة لما للمزدوج نفسه عند مدى درجات الحرارة الواطئة التي تقع ضمنها درجات حرارة النقطتين الباردتين. وبشرط ان تكون النقطتين B و C متقاربتين ومن ثم يقعان عند نفس درجة الحرارة، فالجهد الكهروحراري الناتج سوف ينتقل الآن الى النقطتين D و E ، الشكل (6-2) ، حيث تربط الاسلاك المعادلة الى قطبي الملي فولتميتر.



الشكل (6-2) استخدام اسلاك التوصيل المعادلة

هناك مصدر آخر للخطأ ناتج عن تغير مقاومة الاسلاك المعادلة مع تغير درجة الحرارة، وأن كان هذا التغير قليلاً في الواقع خصوصاً إذا كانت الاسلاك طويلة. يمكن التغلب على هذا الخطأ باستخدام مقاومة موازنة (ballast resistance) في الميلي فولتمتر بحيث تصنع مقاومة الموازنة هذه من بعض السبائك التي معامل حرارة المقاومة لها اوطء، على سبيل المثال، سبيكة المنغانين (manganin) وهي سبيكة من النحاس والمنغنيز والنيكل.

يمكن ان تكون أسلاك المزدوجات الحرارية اما من المعادن الاساسية او المعادن النبيلة النادرة وحسب التطبيقات المطلوبة. تكون أسلاك المعادن الأساسية رخيصة بحيث يمكن استخدام اسلاك سميكة وقوية. وتكون أكثر حساسية أيضاً لكنها محدودة الاستخدام والى حد 1200 C. أما عند درجات الحرارة العالية فيلزم استخدام اسلاك من البلاتين وسبائكه. يجب حفظ هذه الاسلاك من تأثيرات اجواء الافران الضارة وذلك باحاطتها بالطين الحراري او السليكا النقية.

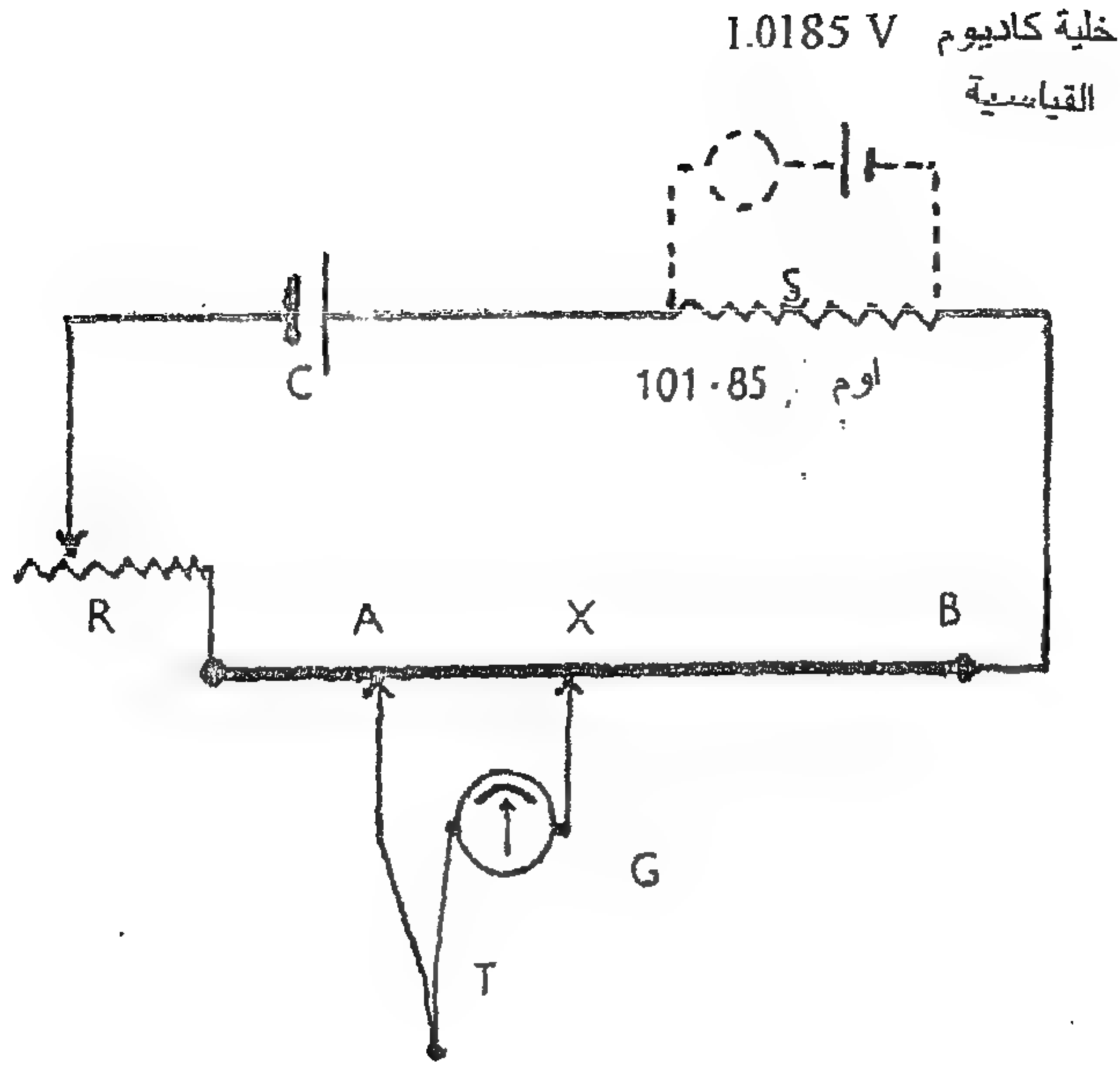
يبين الجدول (2-2) خواص المزدوجات الحرارية المألوفة

نوع المزدوج	التكوين الكيماوي	الحساسية mv/°C	مدى درجة الحرارة (°C)	اعظم درجة حرارة (°C)
نحاس / كونستانتان	Cu كونستانتان 60%Cu 40% Ni	0.054	300 الى -200	600
حديد / كونستانتان	Fe =	0.054	750 الى -200	1000
كروميل / الوميل	كروميل 90%Ni 10%Cr الوميل 95%Ni 2%Al 3%Mn	0.041	1200 الى -200	1350
البلاتين / سبيكة بلاتين روديوم	Pt بلاتين- روديوم 90%Pt 10%Rh	0.0095	1450 الى الصفر	1700
بلاتين- روديوم / بلاتين روديوم	80%Pt 20%Rh 60%Pt 40%Rh	0.0035	1600 الى الصفر	1800
تنكستن / مولوبدينوم	W Mo	0.008	1750 الى الصفر	2000

يمكن أن يكون الملي فولتمتر من النوع الاعتيادي الذي يقيس فرق الجهد مباشرة ومنه يمكن معرفة مقدار درجة الحرارة بالرجوع الى الجدول الخاص بذلك المزدوج الحراري المستخدم. أو قد يقرأ الجهاز درجات الحرارة مباشرة وذلك باستخدام مقاومة معينة تربط داخل جهاز الملي فولتمتر لتغيير قراءات فرق الجهد (mV) الى ما يكافئها من درجات حرارية مباشرة. وفي هذه الحالة يكون لكل نوع من أنواع المزدوجات الحرارية جهاز خاص به لقراءة درجة الحرارة المباشرة حيث لا يمكن استخدامه مع نوع آخر من المزدوجات الحرارية.

أما مقياس الجهد (potentiometer) فيقدم طريقة أدق لقياس القوة الدافعة الكهربائية. تعتمد هذه الطريقة في القياس على مقابلة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة على طرفي المزدوج الحراري بقوة دافعة معاكسة ليتم التعادل.

يتكون مقياس الجهد اساساً من عدد من ملفات المقاومة (B-A) الشكل (2-7) يمر خلالها تيار ثابت من البطارية (C). تتم المحافظة على ثبوت هذا التيار حيث يتم ضبطه أحياناً بواسطة المقاومة المتغيرة R، بحيث ان الانخفاض في الجهد خلال المقاومة الثابتة S، يعادل القوة الدافعة الكهربائية لخلية الكادميوم القياسية Stan-dard Cadimium cell (1.0185V) عند (15 C). وحيث ان الانخفاض في الجهد ، في الدائرة الكهربائية البسيطة يتناسب مع المقاومة ، فالقوة الدافعة الكهربائية المجهولة يمكن أن تقاس بتعادلها ضد الهبوط في الجهد الحاصل عند مقاومة مناسبة معلومة . يتم ربط احد طرفي النقطة الباردة للمزدوج الى النقطة (A) والطرف الآخر الى الكلفانوميتر ومنه الى نقطة ملائمة (X) عبر مفتاح منزلق. يشير الكلفانوميتر الى الصفر عندما تحصل (نصل الى) نقطة التعادل، يدعى هذا الترتيب بطريقة نقطة الخمود (null).



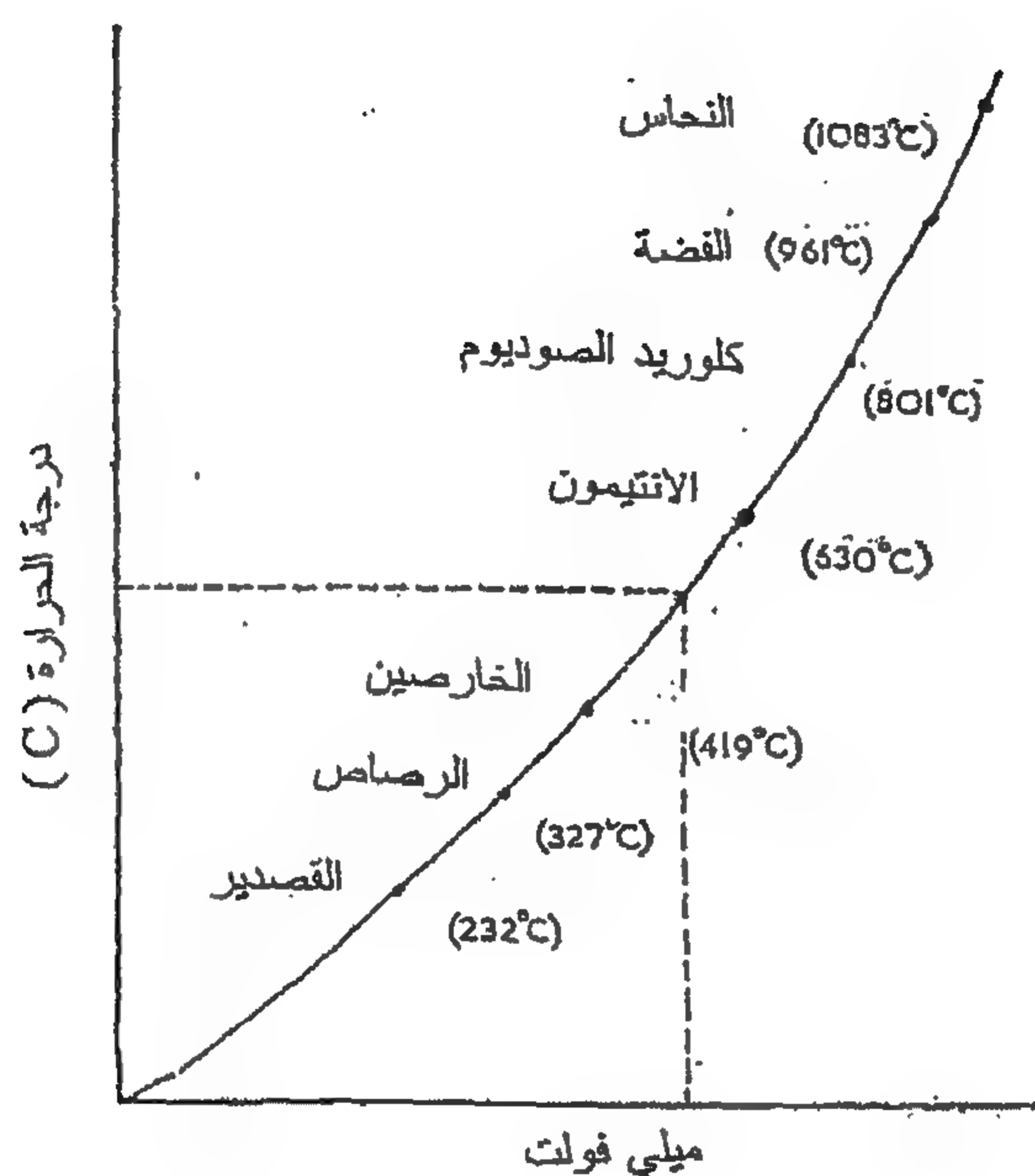
الشكل (7-2) مقياس الجهد .

معايرة وضبط المزدوج الحراري:

يجب ان يتم تعيير وضبط المزدوج الذي سيربط في الدائرة ويستعمل فعلاً وباستخدام اسلاك توصيل معادلة حيث قد ذكرنا ان القوة الدافعة الكهربائية المتولدة من قبل المزدوج نفسه لا تكون مساوية للقوة الدافعة الكهربائية المقاسة من قبل الملي فولتمتر.

يمكن ضبط المزدوج مقابل مزدوج قياس خاص وإذا لم يتوفر فيمكن معايرته (ضبطه) باستخدام النقاط القياسية ، على سبيل المثال نقاط انصهار المعادن النقية كما مرّ ذكره. وذلك من منحنيات التبريد الخاصة بكل معدن بعد رسمه من قراءات

الملي فولتميتير والزمن في حالة المعدن النقي السائل تحت ظروف الاتزان. يتم الحصول على سلسلة من قراءات الملي فولتميتير المقابلة لنقاط انصهار العديد من المعادن المنصهرة. يمكن الآن رسم منحنى بين درجات حرارة الانصهار وقراءات الملي فولتميتير المقابلة لها كما في شكل (8-2) والذي يمثل منحنى معايرة المزدوج الحراري المستخدم.



شكل (8-2) منحنى معايرة كامل لمزدوج حراري والذي رسمت فيه نقاط انجماد المواد المستخدمة ضد القراءات بالملي فولت (mV) المقابلة لنفس نقاط الانجماد.

١٠-٢ أجهزة قياس درجات الحرارة الشعاعية (بايروميتر)

Radiation Pyrometers

من الضروري في بعض الاحيان قياس درجات حرارية عالية فوق مدى المزدوجات الحرارية الاعتيادية او قياس درجة حرارة سطح من النوع الذي لا يمكن أو لا يتلائم وضع جهاز القياس عليه مباشرة ، كأن يكون متحركاً، على سبيل المثال، كما في حالة دحو الفولاذ على الحار. يلزم الامر في مثل هذه الاحوال استخدام جهاز قياس درجات الحرارة ولا يتطلب ان يكون في حالة تماس مباشر مع الجسم الحار، لكنه يقيس شدة الحرارة المشعة من هذا السطح. ولأجل القيام بذلك يجب ان تسود ظروف الجسم الاسود عند السطح المشع، يمكن تعريف الجسم الاسود بأنه الجسم الذي يمتص كل الأشعة الساقطة عليه من دون ان يفقد جزءاً منها بالانعكاس. وبالعكس فهذا الجسم سوف يشع الحرارة بنفس الطريقة. تقترب الى مدى كبير الاشعة المستلمة من الداخل اللافح للفرن المغلق بشكل تام من ظروف الجسم الأسود المثالي. وحيث ان درجة حرارة الهواء الجوي المحيط هي أقل من درجة حرارة الجسم الحار، فتمثل الطاقة الحرارية المستلمة من الجسم والمنبعثة بصورة طليقة الى الخارج جزء من الطاقة اذا كانت الظروف السائدة هي ظروف الجسم الاسود المثالي. يتم تعريف الانبعاثية (emissivity) لسطح ما بأنها نسبة الطاقة الحرارية المنبعثة (المشعة) من قبل السطح الى الطاقة الحرارية المنبعثة من سطح الجسم الاسود عند نفس درجة الحرارة.

يعتمد مقدار الانبعاثية على طبيعة المادة ودرجة حرارة السطح إضافة الى لونه. تقترب السطوح الخشنة، على سبيل المثال، إلى ظروف الجسم الأسود أكثر من السطوح الملساء بغض النظر عن لونها. يبين الجدول (2-3) قيم الانبعاثية لسطوح بعض المواد.

جدول (3-2) الانبعاثية الكلية لسطوح بعض المواد.

الانبعاثية emissivity	المادة
0.02	نحاس (غير متأكسد)
0.70	نحاس (متأكسد)
0.15	نحاس (سائل)
0.05	حديد (غير متأكسد)
0.85	حديد (متأكسد)
0.97	فولاذ الواح (خشن ومتأكسد)
0.95	حديد الزهر (متأكسد بشدة)
0.75	طابوق ناري
0.85	طابوق السليكا

من ملاحظة ان القيم اعلاه تقريبية وتعتمد على درجة الحرارة وخشونة السطح.

يتناسب مجموع الطاقة الحرارية المنبعثة من الجسم مع درجة الحرارة المطلقة مرفوعة للأس اربعة. ويدعى هذا بقانون ستيفان - بولتزمان (Stefan - Boltzman law) ويمكن التعبير عنه بالآتي:

$$E = Z (T^4 - T_0^4) \quad \dots\dots\dots(6-2)$$

حيث تمثل E مجموع الطاقة الحرارية المنبعثة
Z ثابت .

T درجة حرارة السطح المشع المطلقة

T_0 درجة حرارة الهواء المحيط بجهاز قياس درجة الحرارة

وتكون T_0 صغيرة عادة مقارنة بدرجات حرارة العمليات الميثلورجية ولذا يمكن تبسيط القانون اعلاه بالآتي :

$$E = Z T^4 \quad \dots\dots\dots(7-2)$$

وحيث ان الطاقة المنبعثة تزداد عند ارتفاع درجة الحرارة أكثر بكثير من ارتفاع درجة الحرارة النسبي لذلك تكون أجهزة قياس درجات الحرارة الشعاعية أكثر حساسية عند الدرجات الحرارية العالية. وعند معرفة معامل الانبعاثية (e) للسطح المشع يمكن اجراء التصحيح الخاص بالأجسام المشعة في مكان مفتوح وعليه يكون

$$E = Ze T^4 \quad \dots\dots\dots(8-2)$$

حيث تمثل T درجة الحرارة المطلقة الحقيقية. فإذا فرض ان الدرجة الظاهرية التي تتم قرائتها هي (S) عندئذ تكون

$$E = ZS^4 \quad \dots\dots\dots(9-2)$$

أي أن:

$$ZeT^4 = ZS^4$$

$$eT^4 = S^4 \quad \dots\dots\dots(10-2)$$

مثال:

افرض ان درجة الحرارة الظاهرية (الملاحظة) لسطح مطلي باوكسيد النحاس والذي يشع في الهواء (مكان مفتوح) هي 800 C. فإذا علم ان معامل الانبعاثية لاوكسيد النحاس 0.70، احسب درجة الحرارة الحقيقية (T).

الحل: بما أن

$$eT^4 = S^4$$

$$0.7 \times T^4 = (800+273)^4$$

$$\text{Log } 0.7 + 4 \text{ Log } T = 4 \text{ Log } 1073$$

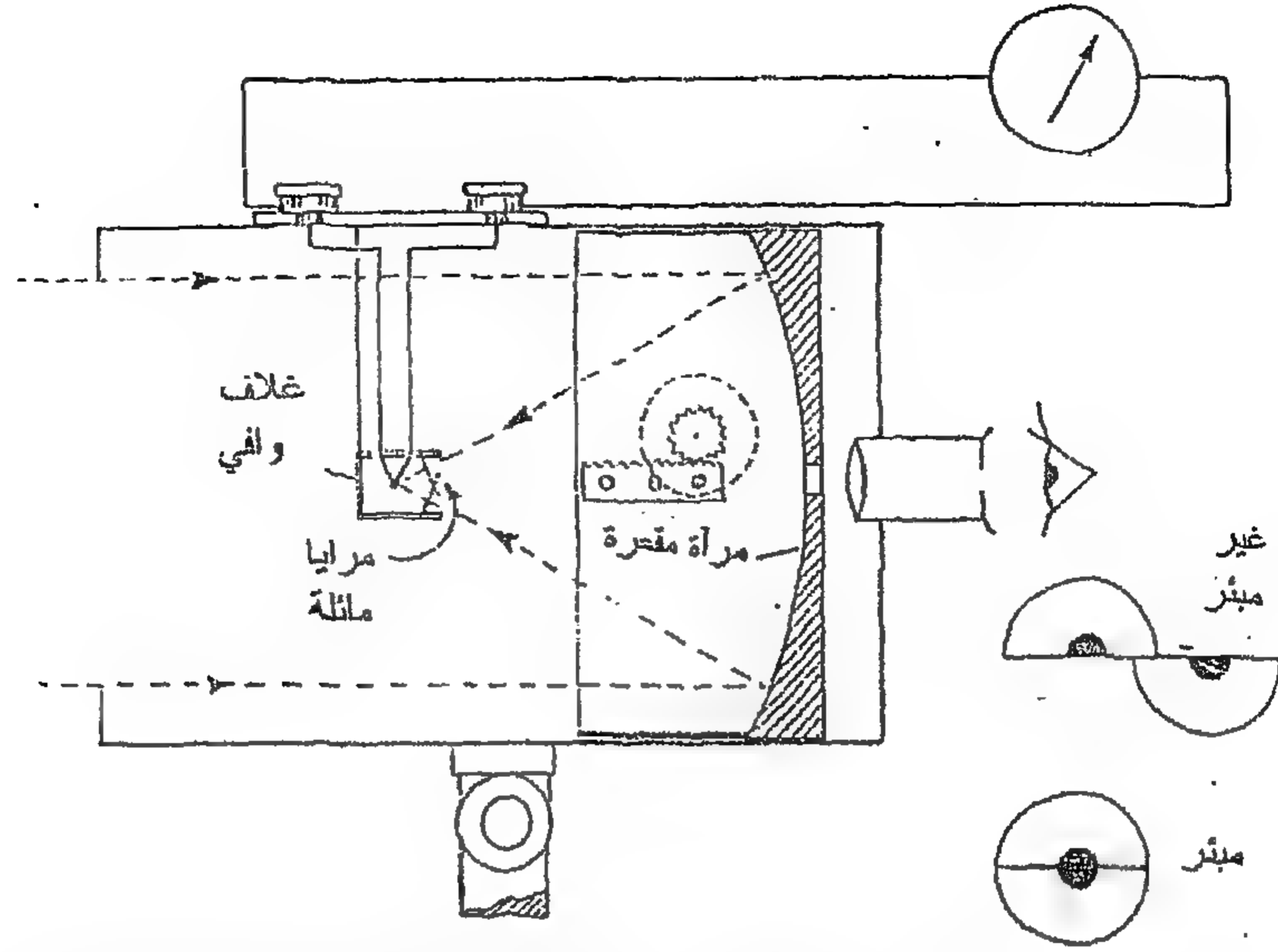
$$T = 1173\text{K or } 900\text{ C}$$

يتم ضبط معظم أجهزة قياس درجات الحرارة الشعاعية لتلائم مدى درجات حراريه بين 700 C° و 2000 C° حيث يتضمن نوع من أنظمة التبئير (focusing) الضوئي لتركيز الاشعة الحرارية على المزدوج الحراري. لايعتمد مثل هذه الاجهزة على المسافة بين الجهاز ومصدر الحرارة بشرط ان تملأ صورة الجسم الحار كامل مجال الرؤية للعدسة العينية. يمكن ان تكون هناك بعض الاخطاء في القراءة نتيجة لتواجد دخان اللهب او بخار الماء في جو الفرن ولذلك يجب مراعاة ذلك كالإنتظار لحين زوال الدخان او غيره.

يبين الشكل (9-2) رسماً تخطيطياً لجهاز قياس درجة الحرارة الشعاعي. وهو يتألف بالأساس من مرآة مقعرة يمكن تحريكها بحيث تركز الاشعة الحرارية على المزدوج الحراري الصغير المثبت داخل الجهاز. يتم التبئير بضبط مكان المرآة حتى يتطابق نصفي الصورة (الدائرة) تماماً كما في الشكل (9-2). يتم عزل المزدوج عن الاشعة الساقطة عليه مباشرة بغلاف صغير ملائم عادة. تستبدل المرآة في بعض الأجهزة بعدسة محدبة لتركيز الاشعة الساقطة كما في حالة أجهزة الخلايا الشمسية لقياس درجات الحرارة.

١١-٢ أجهزة قياس درجات الحرارة الضوئية Optical Pyrometers

تقع ضمن هذه التسمية عدد من الاجهزة المعقدة لقياس درجة الحرارة ولعل أبسطها تلك التي تحتوي على مرشحات متدرجه التلوين والتي من خلالها تتم



الشكل (9-2) أساس جهاز قياس درجة الحرارة الشعاعي لفيري (Fery).

مشاهدة الجسم الحار. يلاحظ التدرج (المقياس) في الحالة التي عندها لا يمكن تمييز اللون. تقاس شدة الضوء أساساً في هذه الأجهزة والتي هي انعكاس لدرجة حرارية معينة. والقاعدة في هذه الأجهزة تعتمد على قانون وين (Wien's Law) الذي يمكن التعبير عنه بالآتي:

$$I = C \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{k}{\lambda T}} \quad \dots\dots\dots(2-11)$$

حيث تمثل I شدة الأشعة المنبعثة من الجسم و λ طولها الموجي و T درجة حرارة الجسم المطلقة و C و k ثابتان و e هي أساس اللوغاريتم الطبيعي. وإذا لم تكن ظروف الجسم الأسود سائده فتكون العلاقة

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S} = \frac{\lambda \log E}{6232} \quad \dots\dots\dots(12-2)$$

حيث أن S هي درجة الحرارة الظاهرية و E الانبعاثية للمادة غير الشفافة وللطول الموجي (λ).

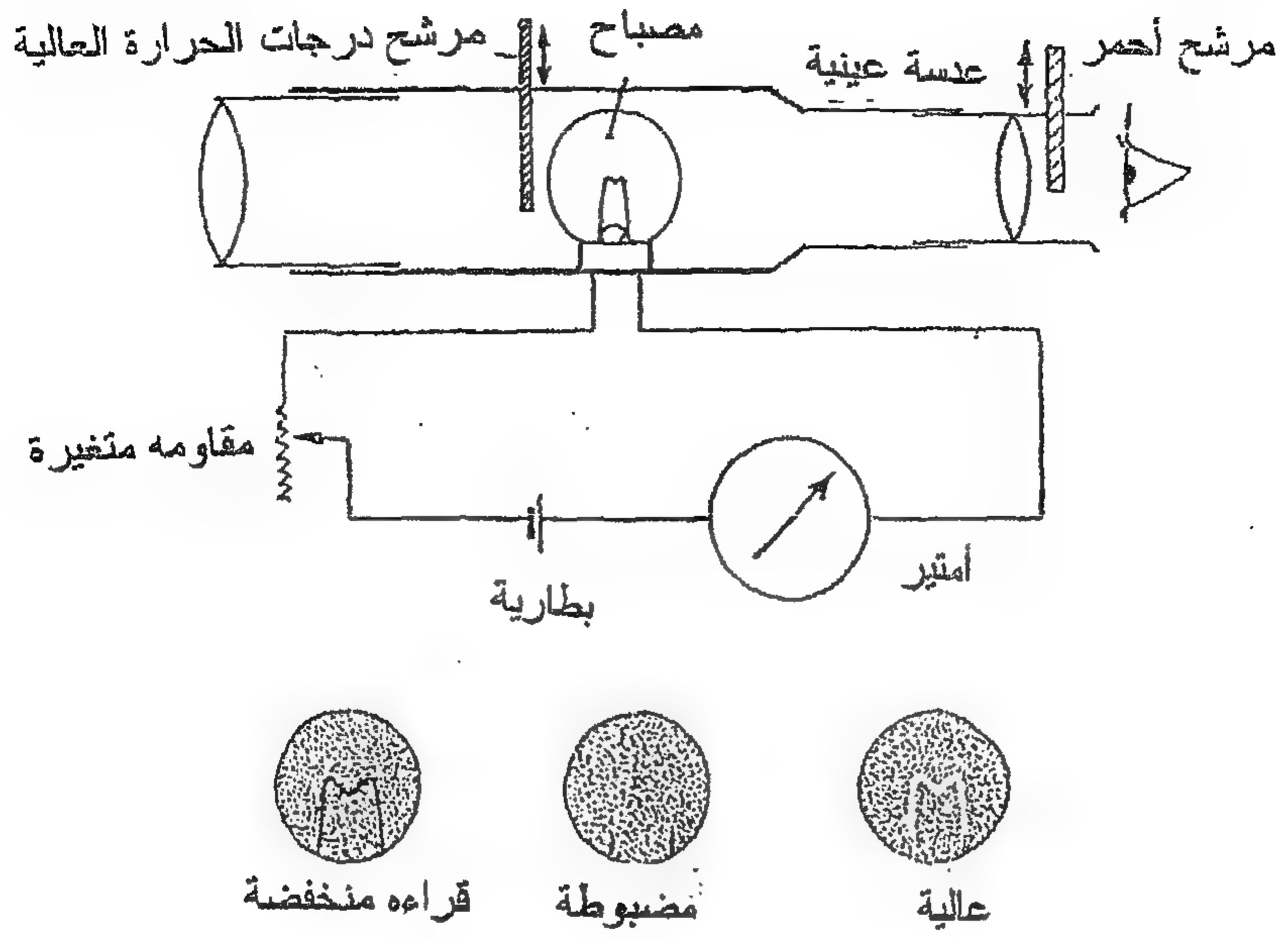
أ- جهاز وانر لقياس درجة الحرارة Wanner Pyrometer

تم في جهاز وانر لقياس درجات الحرارة استخدام مستقطب الضوء حيث تتم المقارنة فيه مع مصباح كهربائي معايير الشدة مسبقاً. وعند النظر من خلال العدسة العينية فسيرى مجال دائري مقسوم الى نصفين، احدهما متعلق بالجسم الحار والنصف الثاني بالمصباح القياسي. يتم تدوير المستقطب (تغيير زاويته) حتى تتساوى أضواء نصف الدائرة عندئذٍ، تؤخذ قراءة درجة الحرارة.

ب- جهاز اختفاء الشعيرة لقياس درجة الحرارة

Disappearing - Filament Pyrometer.

وهو من الاجهزة الضوئية المعروفة لقياس درجات الحرارة (الشكل 2-10). يستخدم في هذا الجهاز مصباح كهربائي قياسي موضوع في مجال رؤية الجسم الحار. تتم إضاءة المصباح ويضبط التيار المار خلال شعيرته بواسطة مقاومة متغيره (Rheostat) حتى يتوافق لون الجسم الحار مع لون الشعيرة تماماً بحيث لا يمكن تمييز الشعيرة في مجال الرؤية اي أنها تختفي. تتم معايرة الاميتر (Ammeter) الموجود بحيث يقرأ درجات حرارية مئوية وبتدريجين احدهما في مدى (700-1500 C) والآخر (1200-2000 C) تقريباً. يتم ادخال مرشح متعادل بين الجسم الحار والشعيرة لتخفيف شدة الاشعة الصادرة عن الجسم الحار، عندما لايفي التدرج المنخفض لقياس درجة حرارة الجسم العالية جداً وعند ذلك يتم استخدام التدرج الاعلى في القياس. يمكن استخدام مرشح آخر أحمر اللون عند العدسة العينية وذلك لإزالة اية فروق موجودة بين لويني الجسم الحار والشعيرة. تتأثر قراءة الجهاز بوجود الدخان واللهب وبخار الماء وغيرها ايضاً ولذلك يجب مراعاة ذلك. وإذا كان الجسم الحار لماعاً فقد تنعكس عليه أضواء من مصادر أخرى حيث يؤثر ذلك على قراءة درجة الحرارة فالمفروض الانتباه الى ذلك.



الشكل (10-2) أساس عمل جهاز اختفاء الشعيرة لقياس درجات الحرارة .

تمارين الفصل الثاني

- ١- اذكر الأسس النظرية التي تعتمد عليها طرائق قياس درجات الحرارة مع الإشارة الى تطبيقاتها.
- ٢- صف الطريقة العملية التي يتم بها تعيين درجة حرارة الانجماد لنموذج من سبيكة Sn - Pb.
- ٣- اذكر الاعتبارات التي يجب ان تراعى عند اختيار طريقة جهاز قياس درجة حرارة (Pyrometer) ملائمة لتطبيق محدد.
- ٤- ناقش مايلي عند استخدام جهاز المزدوج الحراري.
 - أ- المشاكل العملية في قياس درجة حرارة معدن منصهر .
 - ب- ميزة مقياس الجهد (Potentiometer) على جهاز الملي فولتميتير في قياس القوة الدافعة الكهربائية.
 - ج- طريقة المعايرة.
 - د- الغرض الاساس من استخدام اسلاك التوصيل المعادلة.
- ٥- اشرح معنى ظروف الجسم الاسود عند تطبيقها لمجموع الاشعة وأجهزة قياس درجات الحرارة الضوئية.
- ٦- صف جهاز قياس درجات الحرارة الضوئي او الشعاعي، مع ذكر الاحتياطات الواجب اتخاذها للحصول على دقة عالية.
- ٧- ناقش الطرائق الكهربائية المتوفرة والملائمة لقياس مدى من درجات الحرارة بين $300-1600\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ٨- ماهي المحددات عند استخدام المحرار الزئبقي في قياس درجة الحرارة ولماذا لم يكن ملائم لقياس درجة حرارة العمليات الميتالورجية.

الفصل الثالث

أساسيات علم البلورات

Principles of Crystallography

١-٣ المقدمة

يمكن ان يتم تقسيم المواد بصورة عامة الى صنفين اساسيين ، فاما أن تكون المواد بلورية (crystalline) القوام كالماس وجميع المعادن في الحالة الاعتيادية واغلب المواد السيراميكية (الخزفيات) كالأكاسيد والكربيدات والنتريدات وماشاكلها، أو تكون غير بلورية او لابلورية (noncrystalline or amorphous) كأغلب اللدائن (plastics) والزجاج وغيرها.

ان الغاية من التطرق الى أساسيات علم البلورات هنا هي مقدمة لدراسة حيود الاشعة السينية بواسطة البلورات. فيجب قبل دراسة حيود الاشعة السينية، تأمل هندسة وبنية البلورات وذلك لمعرفة كيف تعمل البلورات على حيود الاشعة السينية. يجب ايضاً دراسة الأنواع المختلفة من البلورات وكيفية تصنيفها الى عدد صغير نسبياً من المجموعات. وأخيراً دراسة كيفية تسمية وتحديد او تمثيل الاتجاهات والمستويات الذرية في البلورة وعلى هيئة رموز او رسوم.

ان موضوع البلورات علم واسع، لكنه سيتم التطرق في هذا الكتاب الى الماهيات البسيطة منه، على سبيل المثال كيفية ترتيب الذرات في بعض البلورات المألوفة وعلاقة هذا الترتيب بتحديد الطريقة التي يمكن للبلورة ان تحيد الاشعة السينية.

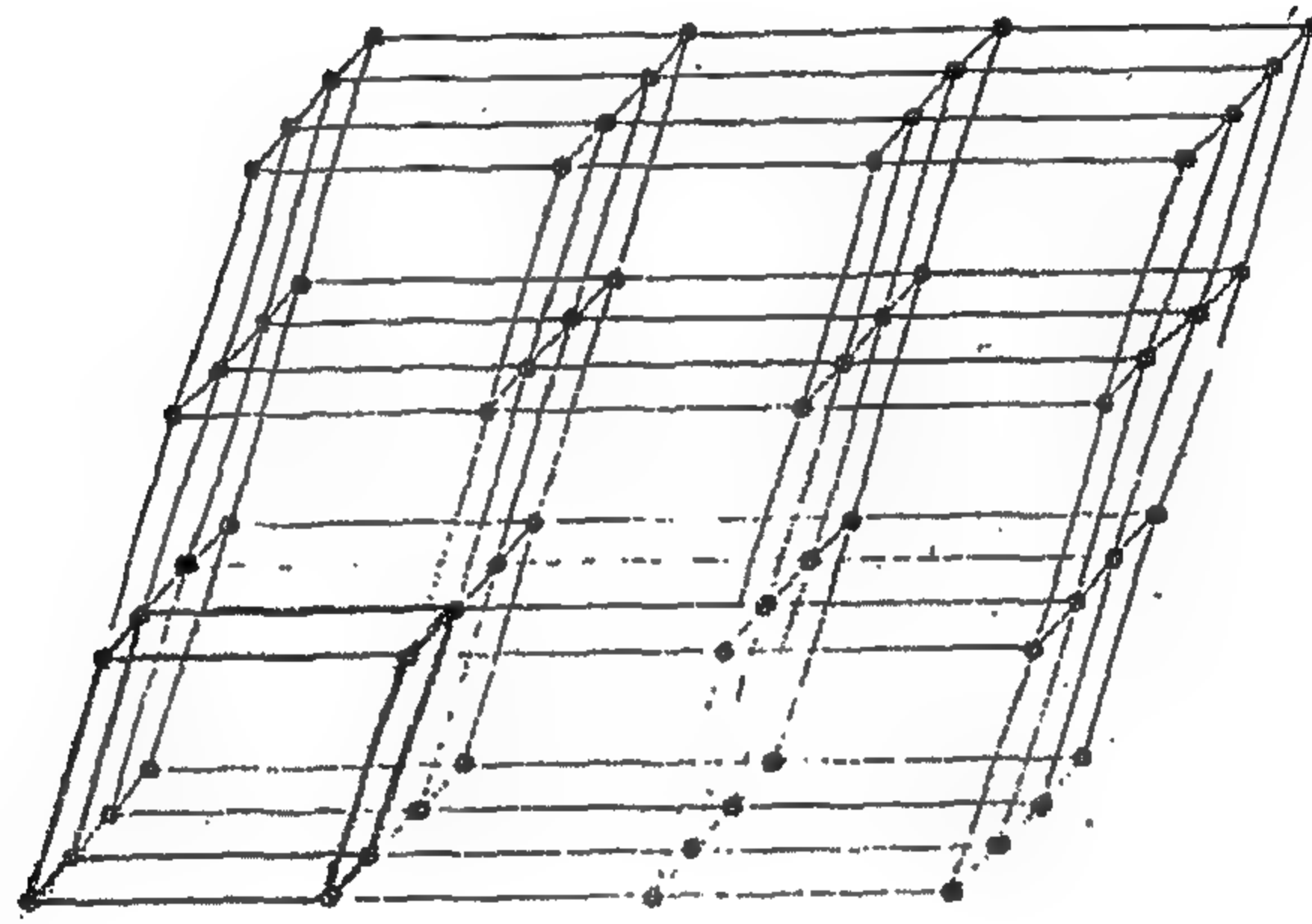
٢-٣ الشبكة البلورية Crystal lattice

يمكن تعريف البلورة بأنها جزء صلب مكون من ذرات مرتبة بانتظام و بنمط متكرر في الابعاد الثلاثة. ولذلك تفرق البلورات عن الغازات والسوائل بشكل رئيس لأن الترتيب الذري في الاخيرين لايمتلك المتطلب الرئيس وهو التكرار (تكرار الترتيب المنتظم). ليس كل المواد الصلبة بلورية حيث ان قسماً منها لابلوري، كما تقدم ذكره، كالزجاج فهي لاتمتلك اي ترتيب داخلي منتظم للذرات . وليس هناك فرق رئيسي بين المواد الصلبة غير البلورية والسوائل إلا أنه يُشار الى المواد الصلبة غير البلورية بأنها سوائل دون المبردة (under cooled) .

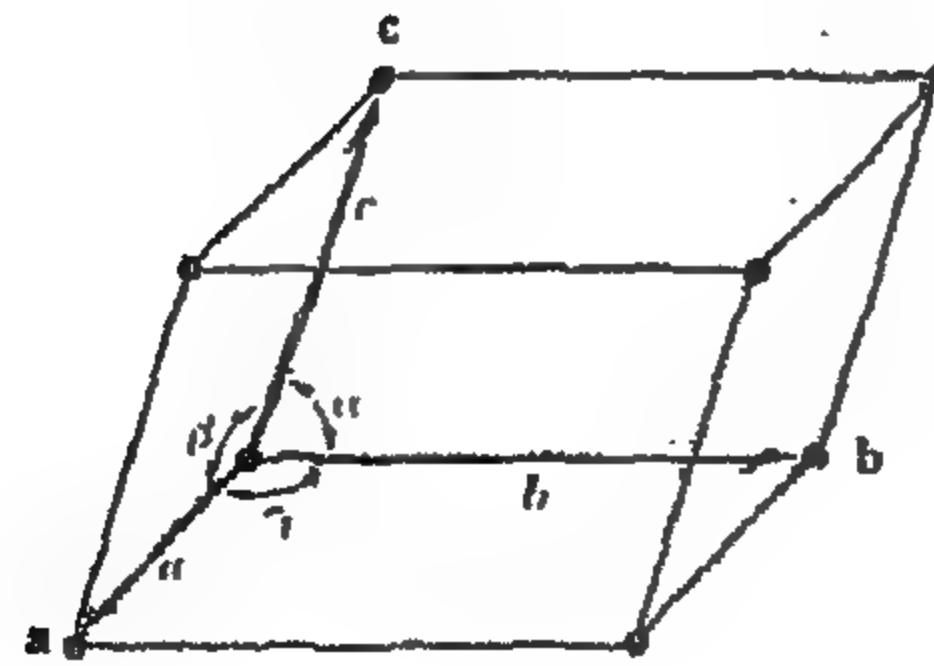
من المعتاد ، عند دراسة البلورات، اهمال الذرات الحقيقية التي تكوّن البلورة وكذلك الترتيب المتكرر في الفضاء، وبدلاً عن ذلك تتم دراسة مجموعة من النقاط الخيالية لها علاقة ثابتة في الفضاء مع ذرات البلورة والتي يمكن ان تعتبر العمود الفقري الذي تبني على أساسه البلورة الحقيقية.

يتم تكوين مجموعة النقاط هذه كالاتي، لنتصور ان الفضاء مقسّم الى ثلاث مجموعات من المستويات تكون كل المستويات في المجموعة الواحدة متوازية ومتساوية البعد عن بعضها. يولد تقسيم الفضاء هذا مجموعة من الخلايا متناظرة في الحجم والشكل والاتجاه بالنسبة الى جاراتها. تكون كل خلية على شكل متوازي السطوح حيث ان كل وجهين متقابلين متوازيين فيكون كل وجه فيها متوازي اضلاع. تتقاطع السطوح المقسمة للفضاء فيما بينها في مجموعة من الخطوط (الشكل 1-3)، ومن ثم تتقاطع هذه الخطوط في مجموعة من النقاط هي تلك التي تمت الاشارة اليها سابقاً. لهذه النقاط المكونة خاصية مهمة هي تكوينها للشبيكة النقطية والتي تعرف بأنها صفوف من النقاط المنتظمة في الفضاء بحيث أن كل نقطة محاطة بترتيب من النقاط المتناظرة و المتماثلة. اي معنى ذلك أنه إذا نظر من نقطة شبيكة باتجاه معين فسيبدو المنظر نفسه تماماً إذا تم النظر بنفس الاتجاه من اية نقطة شبيكة أخرى في الشبيكة النقطية (Point lattice).

وحيث ان كل الخلايا في الشبكة المبينه في الشكل (1-3) متماثلة فيمكن اختيار اية واحدة منها وعلى سبيل المثال تلك المرسومة بخط غامق. كخلية أساسية (unit cell). يمكن اذن وصف الخلية الاساسية بالمتجهات الثلاثة a و b و c المرسومة من احدى زوايا الخلية والتي تعتبر نقطة الاصل (الشكل 2-3). تحدد هذه المتجهات الخلية وتدعى المحاور البلورية للخلية. يمكن ايضاً وصف الخلايا بدلالة أضلاعها (a و b و c) وبدلالة الزوايا التي بينها (α و β و γ). تدعى هذه الأطوال والزوايا بثوابت الشبكة او معلمات الشبكة (lattice Parameters) للخلية الاساسية.



الشكل (1-3) شبكة نقطية.



الشكل (2-3) خلية أساسية.

٣-٣ الأنظمة البلورية Crystal Systems

يمكن تكوين خلايا أساسية ذات أشكال مختلفة عند تقسيم الفضاء بثلاث مجاميع من المستويات بناء على كيفية ترتيب هذه المستويات. فعلى سبيل المثال إذا كانت المجموعات الثلاث من المستويات متباعدة عن بعضها بمسافات متساوية وكانت متعامدة على بعضها بنفس الوقت فالخلية الأساس ستكون مكعبة . فتكون ابعاد الخلية في هذه الحالة متساوية ومتعامدة على بعضها أو أن

$c = b = a$ و $\gamma = \beta = \alpha = 90^\circ$. وهكذا في بقية الانظمة فعند اعطاء قيم معينة لأطوال المحاور والزوايا ، يمكن انشاء خلايا أساسية مختلفة الشكل حيث ينتج عن ذلك مختلف الانوع من الشبكات النقطية، لأن نقاط الشبكة تقع على زوايا (أركان) الخلية . وكنتيجه لذلك يمكن إنشاء سبعة أنواع مختلفة من الخلايا لشمول جميع الشبكات النقطية الممكنة . أي أن هناك سبعة أنواع من الأنظمة البلورية التي يمكن تصنيف كل البلورات ضمنها: يبين الجدول (1-3) الأنظمة الأساسية الممكنة ومواصفاتها.

جدول (1-3) الأنظمة البلورية الأساسية وصفاتها.

النظام	أطوال حرف الخلية و الزوايا	الشبيكة المشتقة أو شبيكة براقص	المواد المتبلورة على هذا المنوال
– المكعب (cubic)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	البسيط (S.C) والمتمركز الجسم (BCC) والمتمركز الوجه (F.C.C)	Cu , Ag, Au Fe, Cr, NaCl
– رباعي الاضلاع (Tetragonal)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	البسيط (S.T) والمتمركز الجسم (B.C.T)	Ti O ₂ , β -Sn
– المعيني أو المتعامد الاضلاع orthorhombic	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $a \neq b \neq c$	البسيط (S.O) والمتمركز الجسم (B.C.O) والمتمركز القاعدة (base C.O.) والمتمركز الوجه (F.C.O)	Fe ₃ C , α -s, Ga
– ثلاثي الاضلاع (Trigonal) أو (Rhombohedral)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	بسيط فقط	As, Sb, Bi والكاسايت (Calcite)
– السداسي (Hexagonal)	$\alpha = \beta \neq 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$ $a = b \neq c$	متراس (HCP)	Zn , Cd , Mg NiAs
– احادي الميل (Monoclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	بسيط (S.M.) ومتمركز القاعدة (base C.M.)	β -S CaSO ₄ .2H ₂ O جبسوم gypsum
– ثلاثي الميل (Triclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	بسيط فقط .	K ₂ Cr O ₇

اذن يمكن الحصول على سبعة شبكات نقطية بوضع النقاط عند زوايا الخلايا الاساسية للأنظمة البلورية السبعة. وهناك ترتيبات اخرى للنقاط تعي بمتطلبات الشبكية النقطية ، والمقصود ان كل نقطة محاطة بأخريات متناظرة من حيث الوضع والحجم والشكل، وقد تبين ان هناك اربعة عشر شبكة نقطية ممكنة فقط وقد سميت باسم العالم الالماني "Bravais" الذي استنتج ذلك "Bravais lattice" فعلى سبيل المثال اذا تم وضع نقطة في مركز كل خلية من خلايا الشبكة النقطية المكعبة فالصفوف الجديدة للنقاط تشكل شبكة نقطية ايضاً. وبالتشابه يمكن ان تتكون شبكة نقطية اخرى من الخلية الاساسية المكعبة التي لها نقاط شبكية عند كل زاوية وفي مركز كل وجه منها وتسمى عندئذ خلية المكعب المتمركز الوجه (FCC).

يبين الجدول (1-3) والشكل (3-3) مواصفات اشكال شبكات برافس (Bravais lattices) الاربعة عشر. تعود نقطة الشبكة في داخل الخلية كلياً الى تلك الخلية، بينما تكون تلك التي في وجه الخلية مشتركة بين خليتين متجاورتين اما تلك التي في زاوية الخلية فمشاركة بين ثمانية خلايا، الا في الخلية السداسية فتكون مشتركة بين ست خلايا. ومن هذا يتضح ان عدد نقاط الشبكة في الخلية الواحدة (عدا السداسية) هو الآتي:

$$N = N_i + \frac{N_f}{2} + \frac{N_c}{8} \dots\dots\dots(1-3)$$

حيث تمثل :

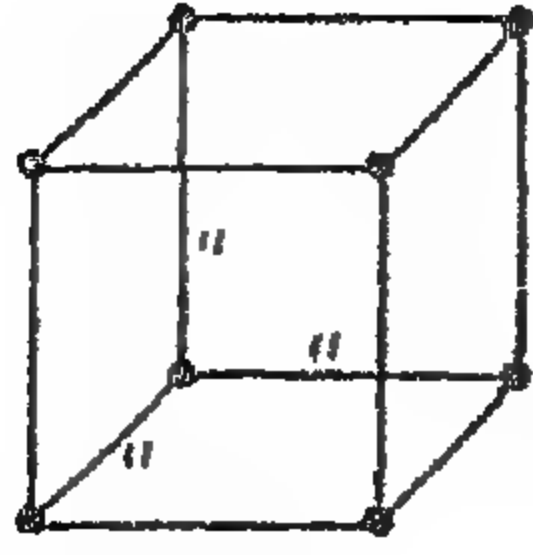
N: عدد النقاط الحقيقي العائد لتلك الخلية.

N_i: عدد النقاط في داخل الخلية.

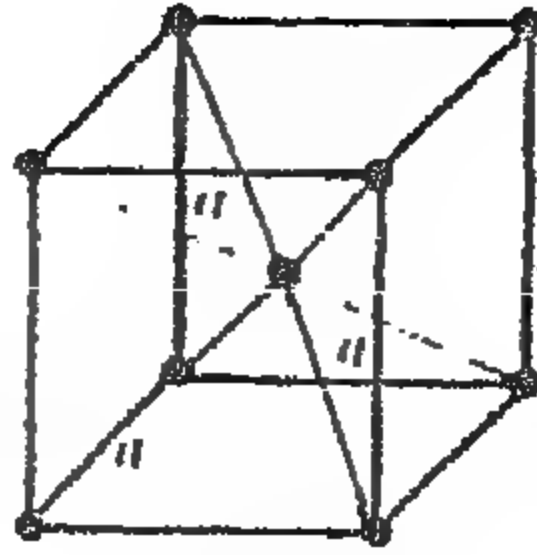
N_f: عدد النقاط في وجه الخلية.

N_c: عدد النقاط في زوايا (أركان) الخلية.

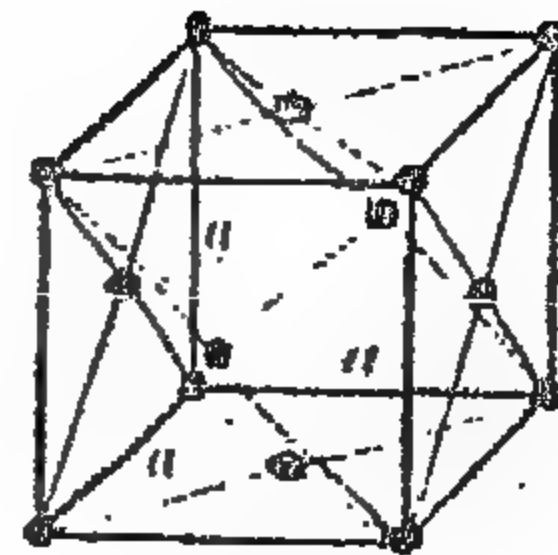
تسمى الخلية التي تحتوي على نقطة شبكية واحدة فقط بالخلية الأولية (Prim-itive cell) بينما تدعى الخلية التي تحتوي على نقاط اضافية في الداخل او في الوجوه، غير الأولية (nonprimitive).



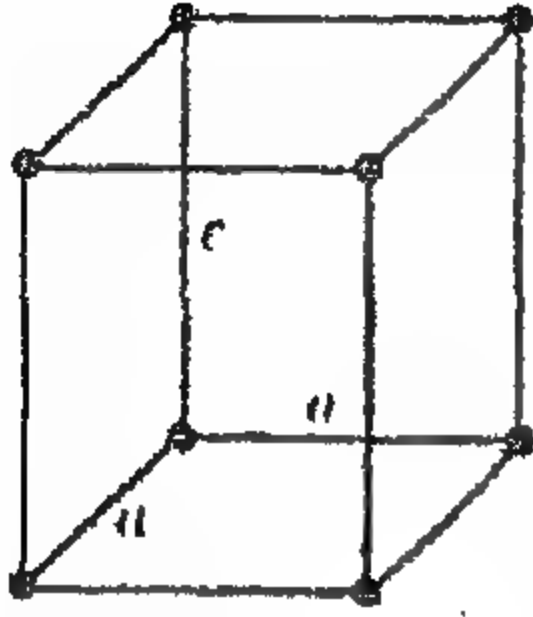
مكعب بسيط



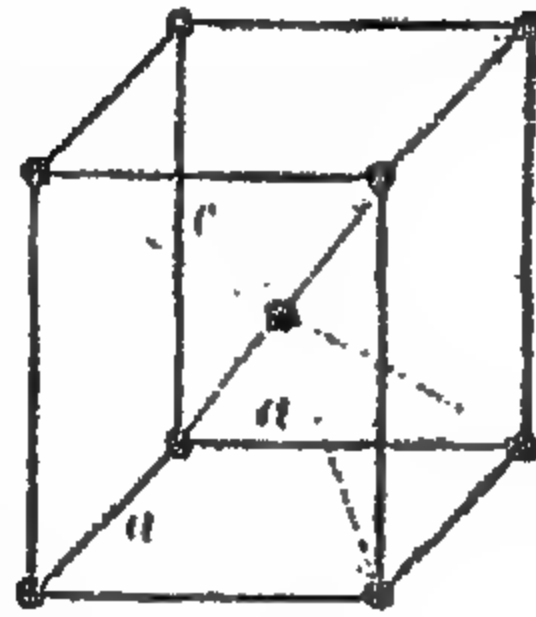
مكعب متمركز
الجسم



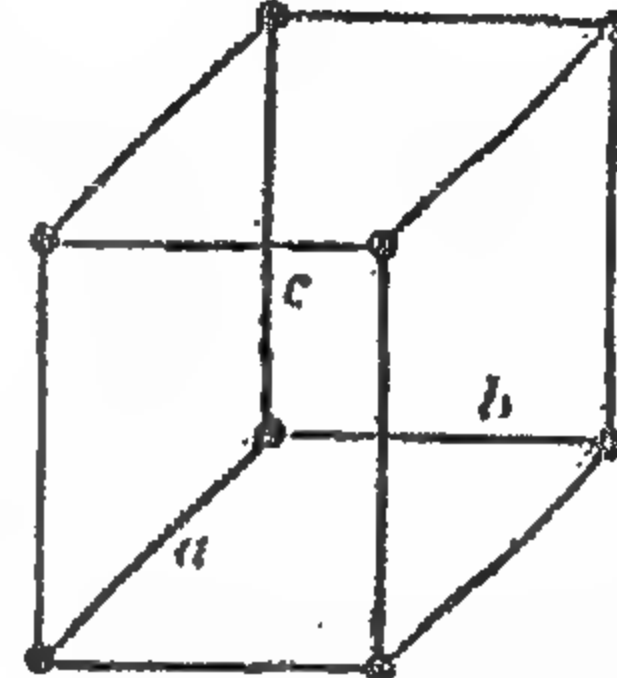
مكعب متمركز
الوجه



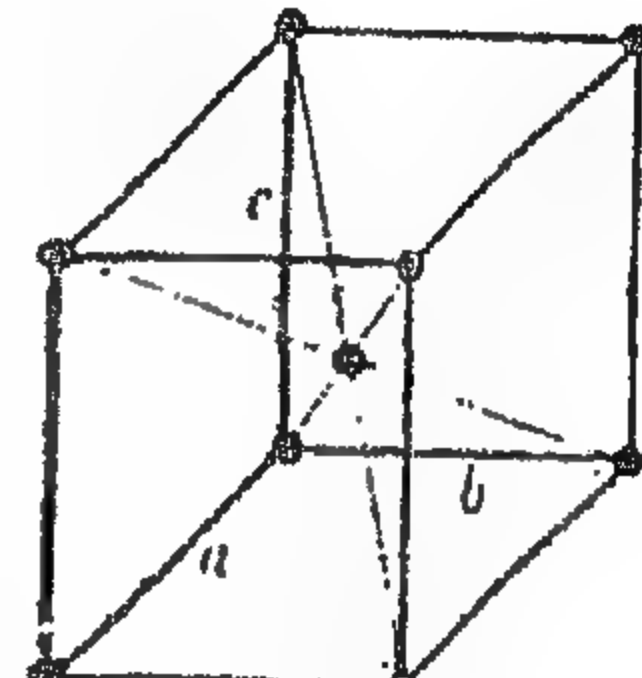
رباعي بسيط



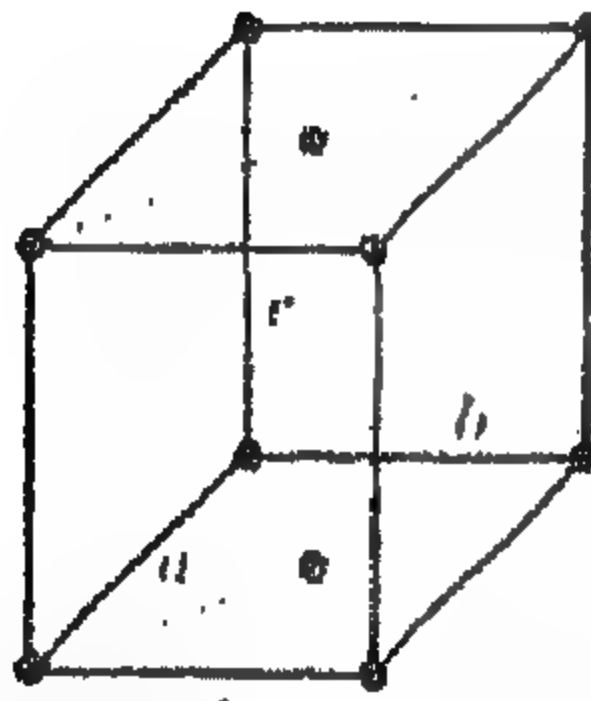
رباعي متمركز
الجسم



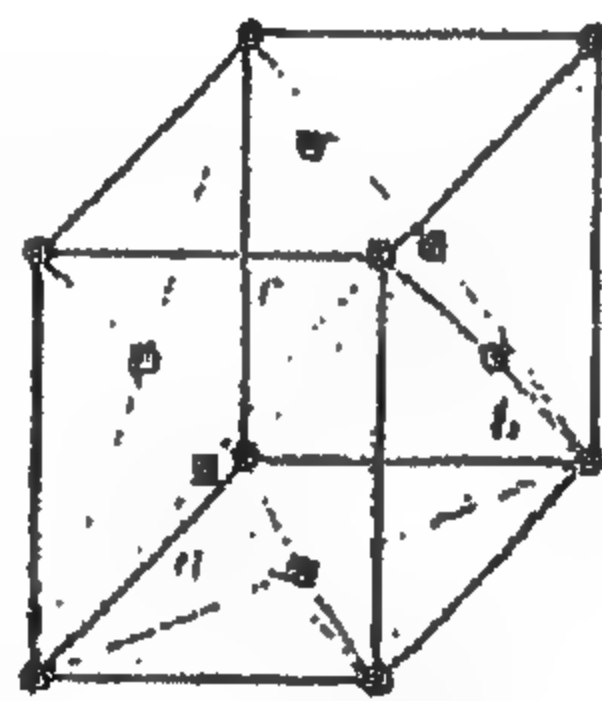
معين بسيط



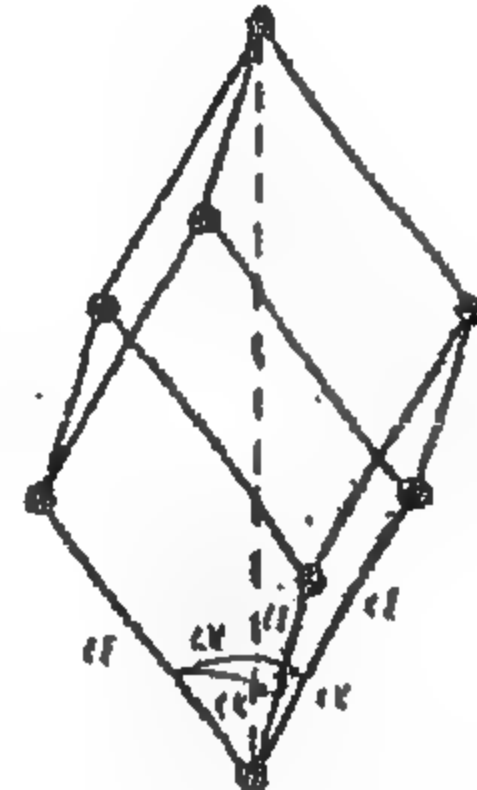
معين متمركز الجسم



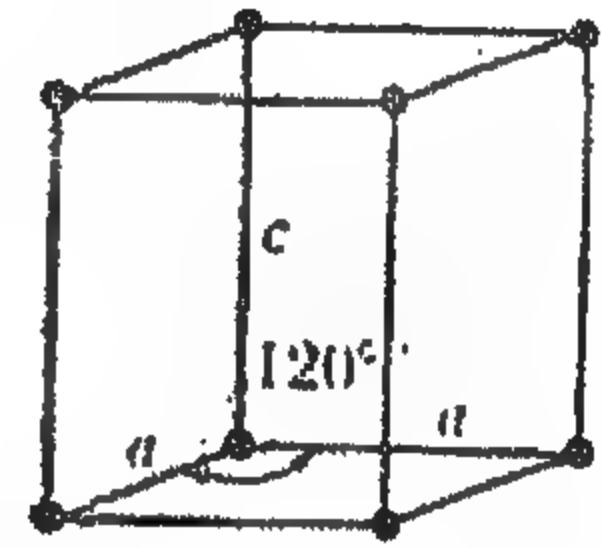
معيني متمركز القاعدة



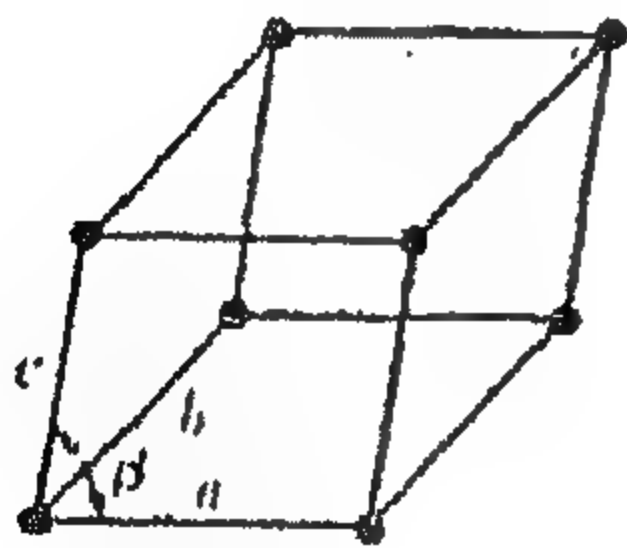
معيني متمركز الوجه



ثلاثي الاضلاع



سداسي



احادي الميل بسيط



احادي الميل متمركز
القاعدة



ثلاثي الميل

الشكل (3-3) الانظمة الاربعة عشر لشبكات براقس.

٣-٤ تعيين نقاط الشبكة:

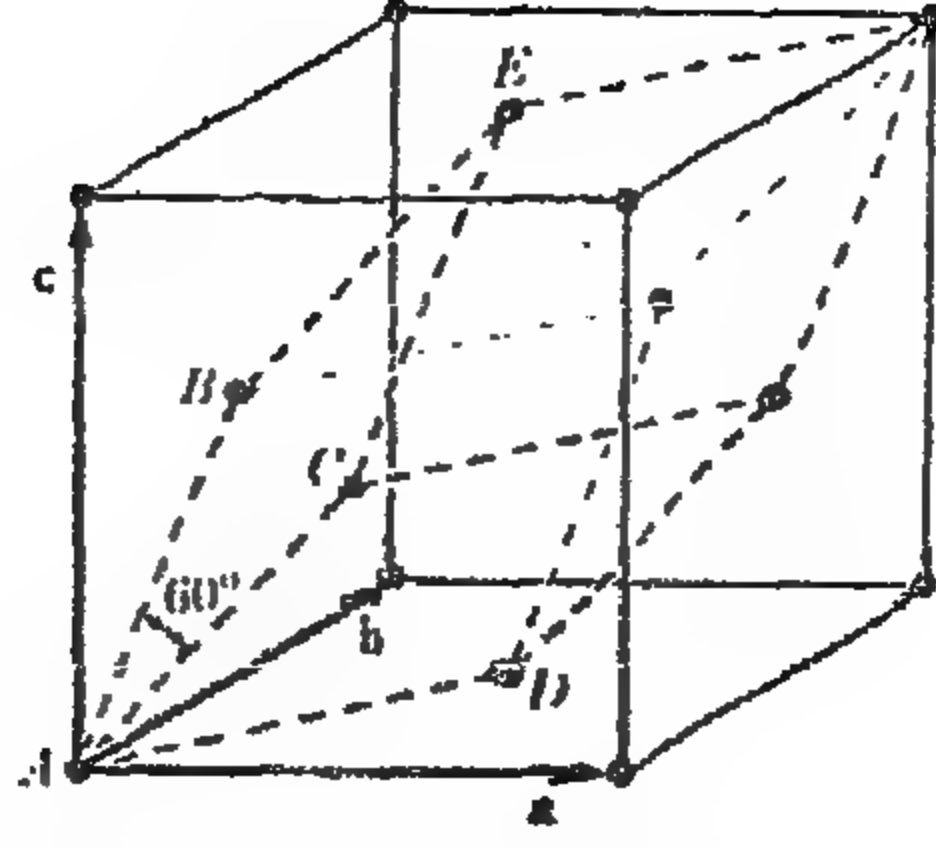
يمكن تعيين مكان اي نقطة شبكية في الخلية بدلالة الاحداثيات . فإذا كان المتجه (Vector) من نقطة الاصل في الخلية الى النقطة المراد تعيينها، له المركبات $\vec{y}\vec{b}$ و $\vec{z}\vec{c}$ و $x\vec{a}$ ، حيث يكون كل من x و y و z صفراً او واحد او كسراً، فإن احداثيات النقطة هي xyz . فإذا أخذت النقطة (A) في الشكل (3-4) كنقطة أصل فتكون احداثياتها 000 واحداثيات النقاط B و C و D هي $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$ على التوالي عند المقارنة باضلاع المكعب . أما احداثيات النقطة E فهي $1\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ وهي مكافئة للنقطة D والمبتعدة عنها بمقدار المتجه \vec{c} . يمكن ان تكون احداثيات النقاط المكافئة متماثلة إذا اضيفت او طرحت مجموعة ذات اعداد صحيحة من الاحداثيات ففي الحالة اعلاه، على سبيل المثال، إذا تم طرح 001 من $1\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ (احداثيات E) سيعطي $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ (وهي احداثيات D).

يلاحظ: أن احداثيات النقطة في مركز جسم الخلية على سبيل المثال، هي $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ بغض النظر عن نوع وحجم الخلية وسواء كانت مكعبة ام غير ذلك. تعتبر عادة احداثيات النقطة المنقولة الناتجة من كل النقاط الثمانية على زوايا الخلية (حيث تشترك كل واحدة منها بمقدار الثمن ($\frac{1}{8}$) من حجمها في الخلية) هي 000 ، يمكن اختصار احداثيات النقاط الاساسية والمنقولة لشبكات نقطية مختلفة بالآتي:

للخلية المتمركزة الجسم 000 و $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$

للخلية المتمركزة الوجه 000 و $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$

للخلية المتمركزة القاعدة 000 و $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$



الشكل (4-3) شبكة نقطية متركزة الوجه والتي تشير الى الخلايا المكعبة وثلاثية الاضلاع.

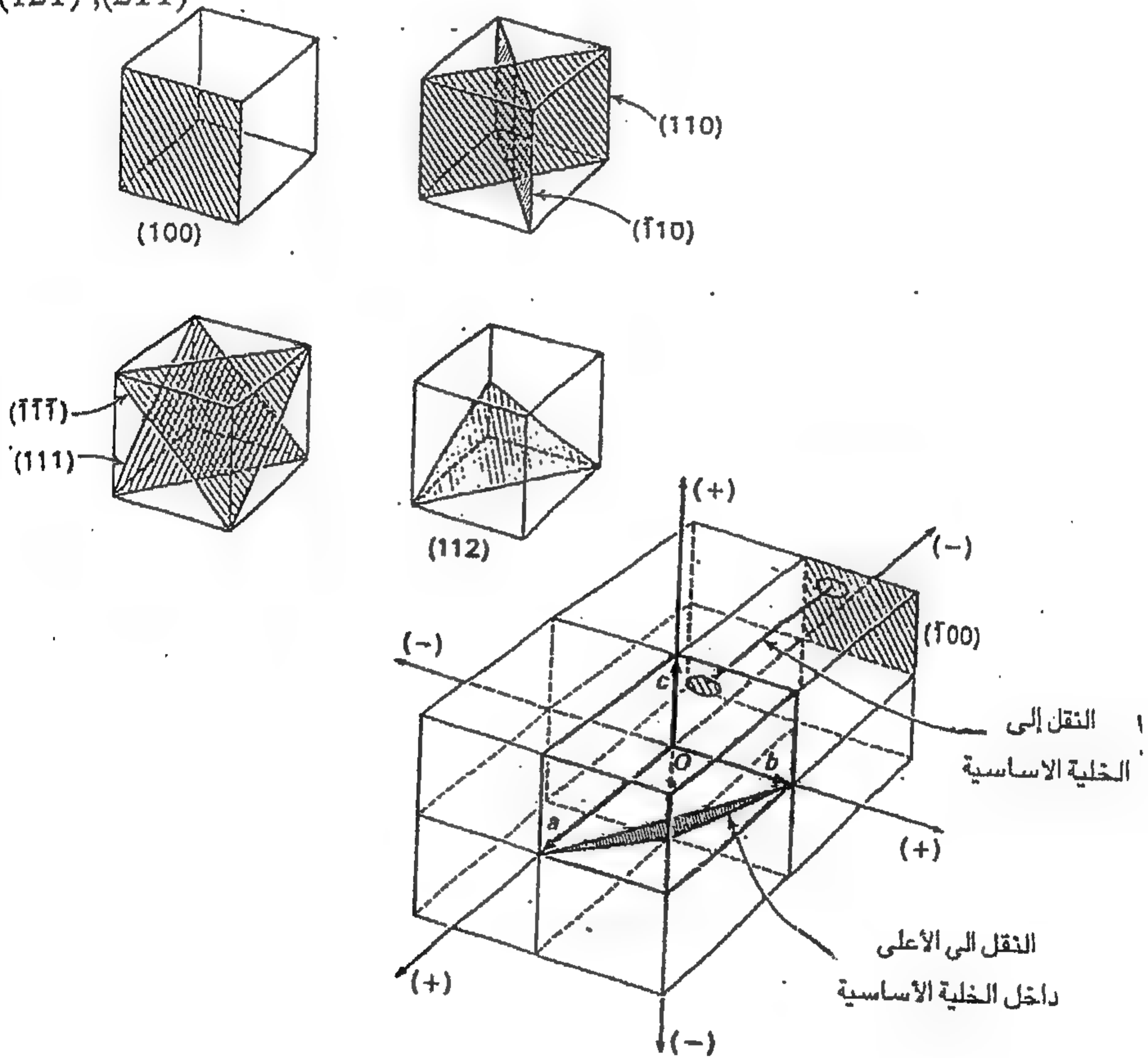
٣-٥ اتجاهات ومستويات الشبكة البلورية:

٣-٥-١ المستويات في البلورات:

تستخدم أدلة ملر (Miller indices) لتعيين المستويات او السطوح الذرية في البلورة التي يتم تحديدها في الخلية الأساسية عادةً. وأدلة ملر هي أرقام تكتب بأسلوب متعارف عليه، فالمستوى المتكون بالتقاطع مع المحاور a و b و c في الشكل 3-2 يعين يأخذ مقلوبات قيم التقاطعات ثم اختزال هذه المقلوبات الى أصغر أعداد صحيحة وذلك بضربها بالعدد المناسب . فالأعداد الناتجة تحصر بين قوسين هلاليين (hkl) وتدعى بأدلة ملر يشير القوسان الهلاليان الى أن أدلة ملر هذه خاصة بمستوى معين hkl يوضح الشكل (5-3) أدلة ملر لعدة مستويات . ومن الجدير بالذكر ان طريقة المقلوبات تسمح ببساطة لكل التقاطعات ان تكون متعلقة بالخلية الاساسية المحدده بأطوال اضلاعها a و b و c . وعليه فالمستوى الذي له التقاطعات $\frac{a}{4}$ و $\frac{b}{4}$ و $\frac{c}{8}$ تكون مقلوباتها 4 و 4 و 8 فتكون أدلة ملر اذن (448) وهذا مواز للمستوى الذي أدلته (112) والمتكون من التقاطعات $\frac{a}{2}$ و $\frac{b}{2}$ و $\frac{c}{2}$. تكون جميع المستويات التي تمتلك تقاطعات خارج الخلية الاساسية ذات علاقة

بمستوى أقل رتبة يقع ضمن الخلية الأساسية. فعلى سبيل المثال يمكن اختزال التقاطعات C و $2b$ و $2a$ الى المقلوبات 1 و $\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{2}$ أو (112) . تكتب مجموعة السطوح التي لها نفس ادلة ملر والتي تقع ضمن الخلية الأساسية كالآتي $\{112\}$ اي ان ادلة ملر محصورة بين قوسين كبيرين (brackets) والمجموعة تعني سطوح متكافئة في الوضع في تلك الشبكة البلورية. تتكون المجموعة $\{112\}$ هذه من 24 مستوي هي:

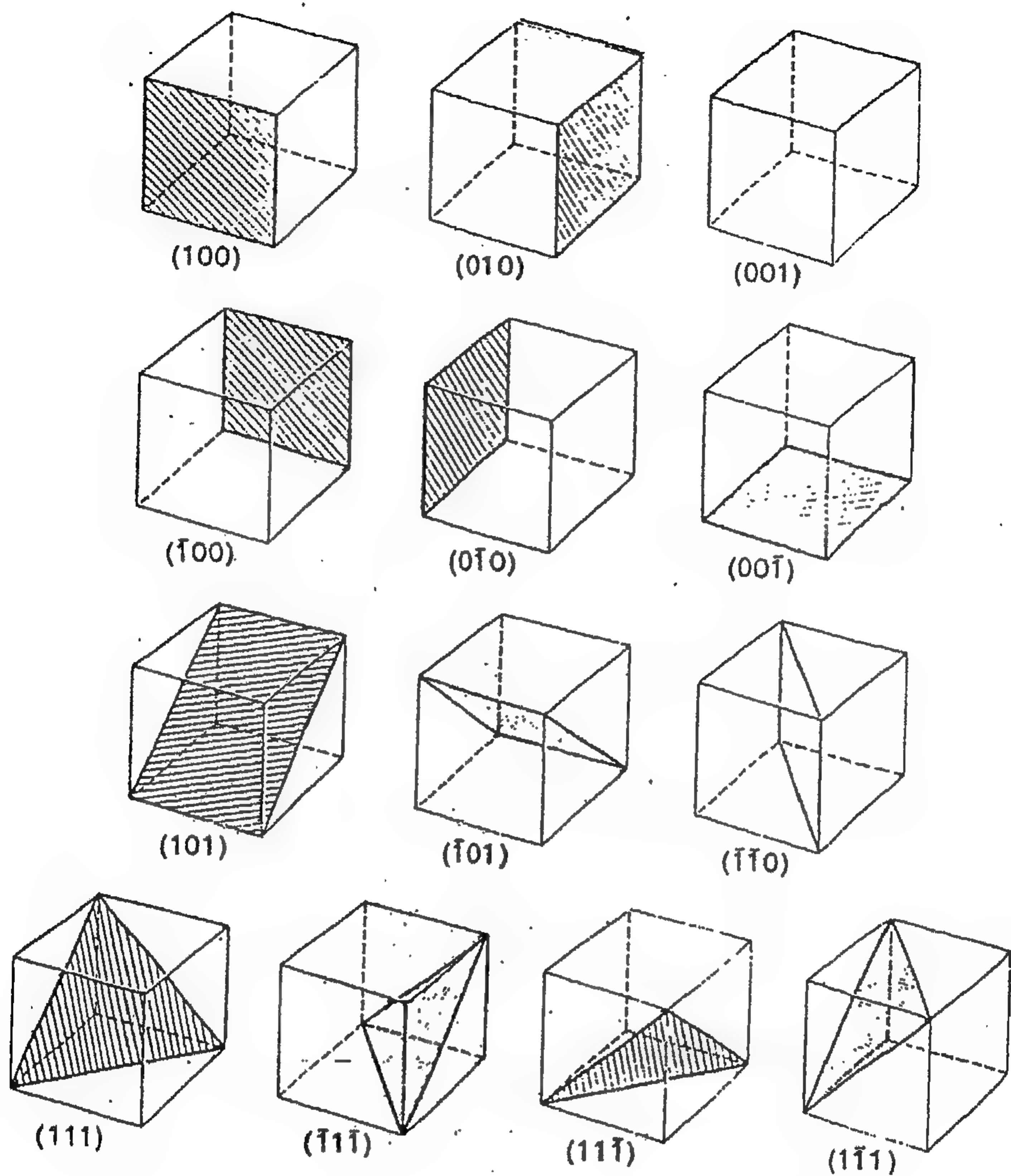
$\{112\} = (112), (121), (211), (\bar{1}\bar{1}2), (\bar{1}\bar{2}1), (\bar{2}\bar{1}1), (1\bar{1}2), (1\bar{2}1), (2\bar{1}1), (12\bar{1}), (21\bar{1}), (11\bar{2}), (\bar{1}\bar{1}\bar{2}), (\bar{1}\bar{2}\bar{1}), (\bar{2}\bar{1}\bar{1}), (1\bar{1}\bar{2}), (1\bar{2}\bar{1}), (2\bar{1}\bar{1}), (\bar{1}\bar{1}2), (\bar{1}\bar{2}1), (2\bar{1}\bar{1}), (\bar{1}\bar{1}\bar{2}), (\bar{1}\bar{2}\bar{1}), (\bar{2}\bar{1}\bar{1})$



الشكل (5-3) تعيين ادلة ملر لمستويات البلورة وأسلوب النقل ذو المكعبات الثمانية للإشارة الى المستويات ذات الادلة السالبة.

تعني الأدلة التي عليها علامة (خط صغير bar) ان لها تقاطعات سالبة. فإذا لوحظ الشكل (5-3) على سبيل المثال، فالتقاطعات c - و b - و a - تكتب بالصورة $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ والتي يجب ان تظهر ايضاً ضمن الخلية الاساسية كما يبدو في الشكل اعلاه. ومن المفيد عند الاشتغال مع المستويات في بلوره استخدام نظام الأدلة لثمانية مكعبات كما مبين في الشكل (5-3) لربط المستويات ذات الأدلة السالبة بالخلية الأساسية.

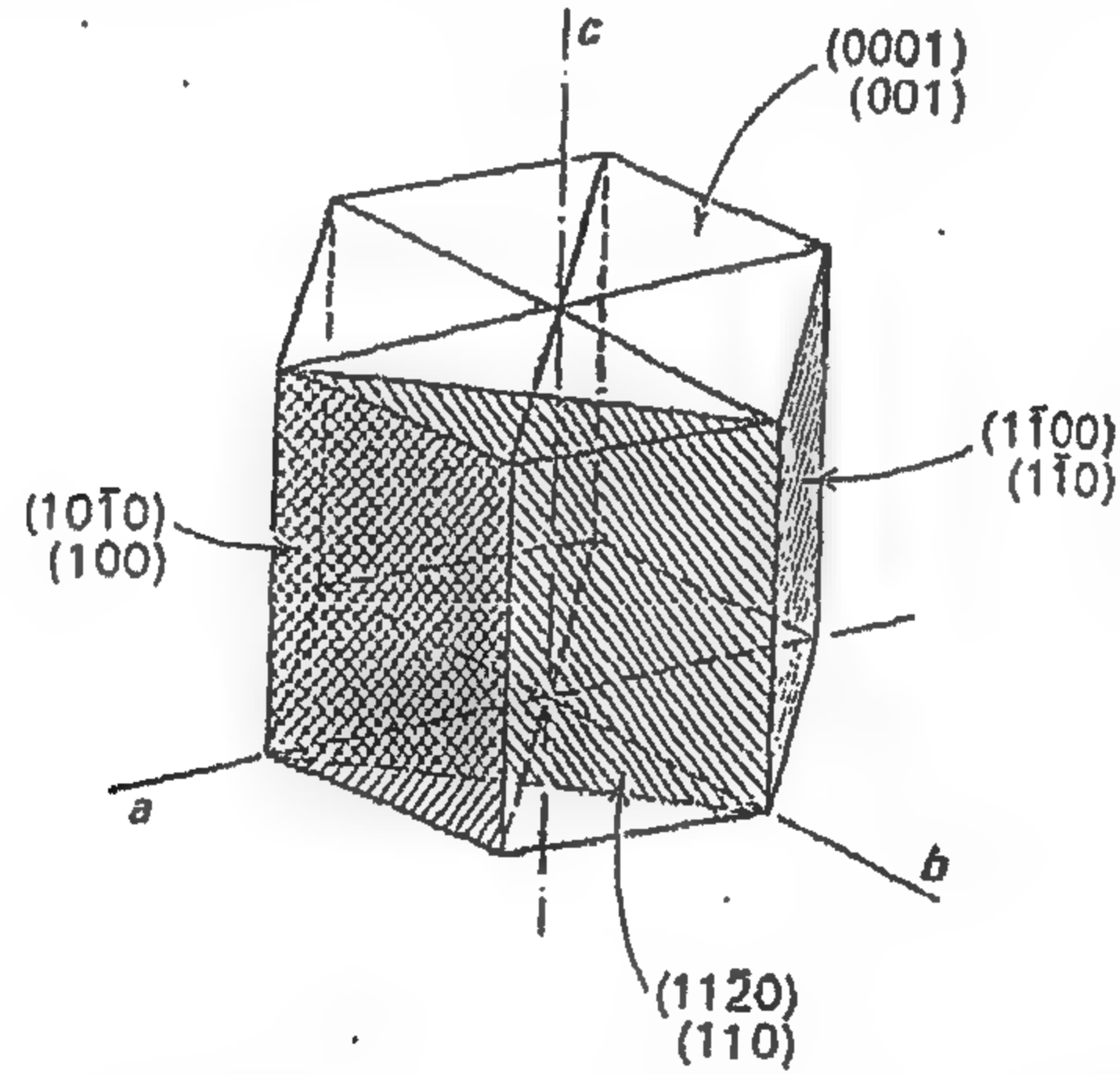
ولتوضيح هذه الفكرة يمكن ملاحظة عدد من المستويات البلورية المعتادة، الشكل (6-3). نلاحظ المستويات ذات الادلة الموجبة وهي (001) و (010) و (100). أما مستويات الادلة السالبة فيمكن تصورها عند نقل نقطة الاصل في احد اركان الخلية الاساسية بحيث يتقاطع ذلك المستوى مع الاحداثيات الثلاثة ولا يمر بنقطة الاصل، كما موضح في الشكل (6-3). ان المستويات $(00\bar{1})$ و $(0\bar{1}0)$ و $(\bar{1}00)$ هي سطوح بلورية مكافئة ومقابلة للسطوح المذكورة اعلاه ذات الادلة الموجبة. وتمثل السطوح $(\bar{1}10)$ و $(1\bar{0}1)$ و $(10\bar{1})$ سطوح بلورية معينة ذات دليل سالب من ادلتها. في حين يكون المستوى $(\bar{1}\bar{1}0)$ مكافئاً ومقابلاً للمستوى (110) لكنه لا يمكن وصفه ضمن الخلية الاساسية سوية مع مكافئة. والواقع فلا يوجد ضير حيث ما يهمنا هنا هو نوع المستوى في الشبكة البلورية. كذلك يمثل المستوى $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ المستوى المكافئ والمقابل للمستوى $(1\bar{1}1)$ ضمن الخلية الاساسية.



الشكل (6-3) بعض السمات البلورية المهمة والتي لها
ادلة ملرموجبة او سالبة وموجبة.

٢-٥-٣ أسلوب كتابة أدلة المستوى في البلورة السداسية:

هناك بعض المساوي من استخدام أدلة ملر عند التعامل مع البلورات السداسية (hexagonal crystals) وهي أن مستويات الشبكة السداسية المكافئة ليست لها أدلة متشابهة. ولحل هذه المشكلة استخدمت ، وبصورة عامة، أدلة ملر - برافيس (Miller - Bravais indices) عند التعامل مع البلورة السداسية وهي (hkil) حيث أن $i = -(h+k)$. وبناء على ذلك فالمستويين (100) و $(\bar{1}10)$ في النظام البلوري السداسي مكافئة للمستويين (1100) و $(10\bar{1}0)$ أي أن مجموعتهما هي $\{1100\}$. يوضح الشكل (7-3) عدداً من المستويات الذرية في البلورة السداسية بدلالة الأدلة الثلاثة (Miller indices) وبدلالة الأدلة الرباعية (Miller- Bravais indices).



الشكل (7-3) المستويات البلورية في النظام السداسي.

٣-٥-٣ الاتجاهات في البلورات:

لقد تم شرح أسلوب تحديد أدلة المستويات البلورية يلزمنا الآن معرفة كيفية تعيين أدلة الاتجاهات في البلورة أيضاً. والأدلة المتبناه للدلالة على الاتجاه تكتب كالاتي $[u \ v \ w]$ ، أما مجموعة الاتجاهات التي لها نفس الأدلة فتكتب محصورة بين

قوسين زاويين (carels) اي $\langle u \ v \ w \rangle$. تعين $u \ v \ w$ ببساطة احداثيات نقطة ما انطلاقاً من نقطة اصل محده (الشكل 2-3) بينما تعني $[u \ v \ w]$ اتجاه خط ما ابتداء من نقطة الأصل الى النقطة المعينة. تستخدم اصغر اعداد صحيحة للأدلة u و v و w لتعيين الاتجاهات البلورية ويتم بشكل عام تجنب استخدام الكسور. ولهذا تكتب الأدلة بشكل قياسي من حيث أن الاتجاهات البلورية تؤلف ادلة او اعداد بسيطة للمتجه . تظهر في بعض الاحيان ادلة سالبة في بعض الاتجاهات البلورية ، على سبيل المثال، في الاتجاه العمود على المستوى ذو الادلة السالبة.

ان الرمز $[u \ v \ w]$ يكفي للدلالة على الاتجاه في البلورات المتعامدة الاضلاع والبلورات بشكل عام، ماعدا شبكية البلورة السداسية . أما الرموز او الأدلة الأكثر استعمالاً في النظام السداسي فتكتب بالصورة الآتية $[U \ VW]$ او $[u \ v \ t \ w]$ حيث أن :

$$U=u - t , \ V= v-t , \ W= w , \ t = -(u+ v) \quad (2-3) \dots\dots\dots$$

أما التحويل من الادلة الثلاثية $[UVW]$ الى الرباعية $[u \ u \ t \ w]$ فيكون باستخدام العلاقات التالية :

$$u = \frac{1}{3} (2 U-V) , \ v = \frac{1}{3} (2V-U), \ t = -(u-v), \ w = W \quad (3-3) \dots\dots\dots$$

ويمكن استخدام نفس هيئة هذه العلاقات عند التحويل من الأدلة الثلاثية الى الرباعية وبالعكس.

٦-٣ علاقة حجم وكثافة الذرات مع الخلية الأساسية:

يمكن بسهولة معرفة العلاقة بين طول ضلع (حرف) الخلية الأساسية وقطر الذرة. ويتم ذلك بعد تحديد اتجاه التراص (packing direction) في ذلك النظام . فعلى سبيل المثال، تكون اتجاهات التراص في بنية المكعب البسيط (Simple Cubic Structure) هي $\langle 100 \rangle$ وفي المكعب المتمركز الوجه (FCC) هي $\langle 110 \rangle$ وفي المكعب المتمركز الجسم (BCC) هي $\langle 111 \rangle$ اما في السداسي المتراس (HCP)

فيكون $\langle 10\bar{1}0 \rangle$. ولهذا تكون العلاقات بين نصف قطر الذرة (R) وطول ضلع الخلية (a) كالاتي :

$R = \frac{a}{2}$	].....(4-3)	المكعب البسيط S.C.
$R = \frac{\sqrt{2}}{4} a$		المكعب المتمركز الوجه FCC
$R = \frac{\sqrt{3}}{4} a$		المكعب المتمركز الجسم BCC
$R = \frac{a}{2}$		السداسي المتراص HCP

أما كثافة الذرات او معامل التراص الذري (Atomic Packing Factor) في الخلية الاساسية فيتم تعريفه بأنه نسبة حجم الذرات العائدة كلياً لتلك الخلية مقسوماً على حجم الخلية نفسها. ويكتب عادة بالنسبة المئوية . لقد تم حساب هذه النسبة في بعض البنى البلورية المألوفة فكانت على وجه التقريب ، كالاتي :

52% S.C في المكعب البسيط

68% BCC المكعب المتمركز الجسم

74% FCC المكعب المتمركز الوجه

74% HCP السداسي المتراص

والفرق الوحيد بين FCC و HCP هو في نسق او اسلوب التراص .

٣-٧ المسافة بين المستويات Interplanar distance

يمكن ايجاد المسافة (d) بين المستويات المتجاورة في المجموعة (hkl) بتطبيق العلاقات الآتية وحسب النظام البلوري .

ففي المكعب

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad \text{.....(5-3)}$$

- رباعي الاضلاع

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad \text{.....(6-3)}$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{a^2} \dots\dots(7-3) \quad \text{- السداسي}$$

- ثلاثي الاضلاع

$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2) \sin^2 \alpha + 2(hk + kl + hl)(\cos^2 \alpha + \cos \alpha)}{a^2(1 - 3 \cos^2 \alpha + 2 \cos^3 \alpha)} \dots\dots (8-3)$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \dots\dots(9-3) \quad \text{- المعيني:}$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos \beta}{c^2} \right) \dots\dots(10-3) \quad \text{- احادي الميل}$$

ثلاثي الميل :

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{V^2} (S_{11}h^2 + S_{22}k^2 + S_{33}l^2 + 2S_{12}hk + 2S_{23}kl + 2S_{13}hl) \dots\dots(11-3)$$

حيث تمثل

a و b و c أطوال احرف الخلية و α و β و γ الزاوية بين كل اثنين منها و V حجم الخلية الاساسية وأن

$$S_{11} = b^2 c^2 \sin^2 \alpha$$

$$S_{22} = a^2 c^2 \sin^2 \beta$$

$$S_{33} = a^2 b^2 \sin^2 \gamma$$

$$S_{12} = abc^2(\cos \alpha \cos \beta - \cos \gamma)$$

$$S_{23} = a^2bc (\cos \beta \cos \gamma - \cos \alpha)$$

$$S_{13} = ab^2c (\cos \gamma \cos \alpha - \cos \beta)$$

٨-٣ الزوايا بين المستويات البلورية:

يمكن ايجاد مقدار ϕ التي تمثل الزاوية بين المستوى $(h_1 k_1 l_1)$ ذو المسافة البينه d_1 والمستوى $(h_2 k_2 l_2)$ ذو المسافة البينه d_2 من المعادلات الآتية وحسب البنية البلورية.

– في المكعب

$$\cos \phi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2)}} \quad \dots(12-3)$$

– وفي رباعي الأضلاع

$$\cos \phi = \frac{\frac{h_1 h_2 + k_1 k_2}{a^2} + \frac{l_1 l_2}{c^2}}{\sqrt{\frac{h_1^2 + k_1^2}{a^2} + \frac{l_1^2}{c^2} \cdot \frac{h_2^2 + k_2^2}{a^2} + \frac{l_2^2}{c^2}}} \quad \dots(13-3)$$

وفي السداسي

$$\cos \phi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + \frac{1}{2} (h_1 k_2 + h_2 k_1) + \frac{3a^2}{4c^2} l_1 l_2}{\sqrt{(h_1^2 + k_1^2 + h_1 k_1 + \frac{3a^2}{4c^2} l_1^2)(h_2^2 + k_2^2 + h_2 k_2 + \frac{3a^2}{4c^2} l_2^2)}} \quad \dots(14-3)$$

وفي ثلاثي الأضلاع

$$\cos \phi = \frac{a^4 d_1 d_2}{V^2} [\sin^2 \alpha (h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2) + (\cos^2 \alpha - \cos \alpha)(k_1 l_2 + k_2 l_1 + l_1 h_2 + l_2 h_1 + h_1 k_2 + h_2 k_1)] \quad \dots(15-3)$$

وفي المعين

$$\cos \phi = \frac{\frac{h_1 h_2}{a^2} + \frac{k_1 k_2}{b^2} + \frac{l_1 l_2}{c^2}}{\sqrt{\left(\frac{h_1^2}{a^2} + \frac{k_1^2}{b^2} + \frac{l_1^2}{c^2}\right) \left(\frac{h_2^2}{a^2} + \frac{k_2^2}{b^2} + \frac{l_2^2}{c^2}\right)}} \quad \dots(16-3)$$

– وفي احادي الميل:

$$\cos \phi = \frac{d_1 d_2}{\sin^2 \beta} \left[\frac{h_1 h_2}{a^2} + \frac{k_1 k_2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{l_1 l_2}{c^2} - \frac{(l_1 h_2 - l_2 h_1) \cos \beta}{ac} \right] \quad \dots\dots\dots(17-3)$$

وفي ثلاثي الميل:

$$\cos \phi = \frac{d_1 d_2}{V_2} [S_{11} h_1 h_2 + S_{22} k_1 k_2 + S_{33} l_1 l_2 + S_{23}(k_1 l_2 + k_2 l_1) + S_{13} (l_1 h_2 + l_2 h_1) + S_{12} (h_1 k_2 + h_2 k_1)] \quad \dots\dots\dots(18-3)$$

٩-٣ حجم الخلية الأساسية:

يمكن معرفة حجم الخلية الأساسية (V) وحسب البنية البلورية بدلالة طول أحرف الخلية (a و b و c) من العلاقات الآتية:

– قالمكعب $V = a^3 \quad \dots\dots\dots(19a-3)$

– ولرباعي الاضلاع $V = a^2 c \quad \dots\dots\dots(19b-3)$

– وللسداسي $V = \frac{\sqrt{3} a^2 c}{2} = 0.866 a^2 c \quad \dots\dots\dots(19c-3)$

– ولثلاثي الأضلاع: $V = a^3 \sqrt{1 - 3 \cos^2 \alpha + 2 \cos^3 \alpha} \quad \dots\dots\dots(19d-3)$

– وللمعيني $V = abc \quad \dots\dots\dots(19e-3)$

– ولأحادي الميل $V = abc \sin \beta \quad \dots\dots\dots(19f-3)$

– ولثلاثي الميل $V = abc \sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma} \quad \dots\dots\dots(19g-3)$

١٠-٣ كثافة المادة:

يمكن حساب كثافة المادة اذا علم وزنها الذري وعرفت بنيتها البلورية بوساطة حيود الاشعة السينية .

$$\text{الكثافة } (\rho) = \frac{\text{وزن الذرات في الخلية الأساسية}}{\text{حجم الخلية الأساسية}}$$

$$\rho = \frac{n A}{N V} \quad \text{أو} \quad (20-3) \dots\dots\dots$$

حيث n تمثل عدد الذرات في الخلية الأساسية.

A : الوزن الذري.

N : عدد افوكادرو (6.023×10^{23})

V : حجم الخلية الأساسية

وتسمى الكثافة المحسوبة هذه بكثافة الاشعة السينية في بعض الاحيان.

تمارين الفصل الثالث

- ١- عرف معنى المواد البلورية وغير البلورية واعط أمثلة على ذلك لكل منهما.
- ٢- عرف ماييلي: أ- الخلية الأساسية . ب- الخلية الأولية . ج- الشبكة البلورية.
- ٣- أ- صنف الانظمة البلورية واذكر مثالا لكل صنف منها.
ب- ماهي العلامات التي يتم على أساسها التفريق بين الانظمة البلورية الاربعة عشر.
- ٤- ارسم خلايا البنى البلورية الأكثر شيوعاً في المعادن مع ذكر معدنين يتبلوران على شاكلة كل منهما.
- ٥- لماذا استعويض عن ادلة ملر بأدلة ملر- برافس (الرباعية) في تعيين المستويات او المتجهات في البنية البلورية السداسية.
- ٦- ارسم الاتجاهات التالية $[100]$ و $[1\bar{1}0]$ و $[01\bar{1}]$ و $[111]$ و $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ و $[10\bar{1}1]$ و $[11\bar{2}0]$ و $[122]$ و $[1\bar{1}02]$.
- ٧- ارسم المستويات الذرية التالية : (100) و $(10\bar{1})$ و (201) و $(20\bar{2}1)$ و $(10\bar{1}1)$ و $(\bar{1}012)$ و $(01\bar{1}0)$ و (211) ثم $(1\bar{1}\bar{1})$.
- ٨- كم هو عدد اعضاء (مستويات) المجموعة $\{123\}$ اذكرها بالتفصيل .
- ٩- اشتق العلاقة بين ثابت الخلية (a) ونصف قطر الذرة في المكعب البسيط والمكعب المتمركز الجسم والمكعب المتمركز الوجه ثم السداسي المتراص .
- ١٠- احسب معامل التراص الذري (APF) في كل من بنى المكعب البسيط والمكعب المتمركز الجسم والمكعب المتمركز الوجه والسداسي المتراص. ماذا نستنتج من ذلك .

- ١١- احسب المسافة (d) بين المستويات الذرية (111) في بنية الشبيكة المكعبة.
- ١٢- احسب الزوايا بين المستوى (111) وبقيّة اعضاء المجموعة {111} في بنية الشبيكة المكعبة.
- ١٣- احسب نصف قطر ذرة عنصر الكروم (BCC) اذا علمت ان كثافته (7.19g/cm³) ووزنه الذري 52.0 gm/mole .
- ١٤- احسب كثافة عنصر النحاس (Cu) (FCC) إذا علمت أن وزنه الذري 63.5g/mole وأن نصف قطر ذرته 0.1278 nm . قارن بين هذه القيمة وقيمة كثافة النحاس العملية 8.94g/mole . ماذا تستنتج من ذلك .

الفصل الرابع

خصائص الأشعة السينية

١-٤ المقدمة:

لقد تم اكتشاف الأشعة السينية سنة ١٨٩٥ من قبل العالم الفيزيائي الألماني رونتك (Roentgen) وسميت بهذا الإسم لأن طبيعتها كانت مجهولة في ذلك الوقت. تختلف هذه الأشعة عن الضوء الاعتيادي من حيث كونها غير مرئية، لكنها تسير بخطوط مستقيمة وتتأثر على افلام التصوير كما هي الحالة في الضوء. ومن الجانب الآخر، فإن لها قدرة أكبر بكثير من الضوء على الاختراق فتخترق جسم الانسان والخشب وحتى قطع المعادن السميكة والأجسام المعتمة الأخرى بسهولة نسبياً كما تقدم التنويه عنه في الفصل الأول.

لقد تم تحديد طبيعة هذه الأشعة سنة ١٩١٢ وفي هذه السنة بالذات تم اكتشاف ظاهرة حيود الأشعة السينية بواسطة البلورات، وهذا الاكتشاف أثبت الطبيعة الموجية لهذه الأشعة وزودنا بطريقة جديدة لدراسة بنية المادة. يظهر الحيود بشكل مباشر تفاصيل البنية الداخلية وإلى حد 10^{-8} cm فصار لحيود الأشعة السينية تطبيقات كثيرة في حقل هندسة المعادن والمواد بشكل عام.

لقد علمنا أن طبيعة الأشعة السينية هي نفس طبيعة الضوء إلا أن طولها الموجي قصير جداً . يستعمل الانكستروم (Å) (Angstrom) عادة، كوحدة لقياس طولها الموجي، وهو يساوي 10^{-8} cm وعليه فكل $1 \text{ nm} = 10 \text{ Å}$ والطول الموجي للأشعة المستخدمة في الحيود يقع بين $0.5-2.5 \text{ Å}$. بينما يكون الطول الموجي للضوء المرئي بحدود 6000 Å ، إذا ما أريدت المقارنة.

يرتبط الطول الموجي مع التردد بالعلاقة التالية:

$$\lambda = \frac{C}{\nu} \dots\dots\dots (1-4)$$

حيث تمثل λ الطول الموجي و ν التردد و C سرعة الضوء = $3 \times 10^8 \text{ m/sec}$.

تحمل الاشعاعات الكهرومغناطيسية كالأشعة السينية، طاقة ويدعى معدل انسياب هذه الطاقة خلال وحدة المساحة العمودية على اتجاه حركة الموجه بالشدة (I). يتناسب معدل قيمة الشدة طردياً مع مربع السعة "A" (Amplitude). تقاس الشدة بالوحدات المطلقة ($\text{Joules/m}^2/\text{sec}$). إلا انه نادراً ما تقاس الشدة بهذه الوحدات وبدلاً من ذلك تقاس بأساس نسبي كمقدار أسوداد فلم التصوير الذي تم تعريضه للأشعة السينية.

تشع الشحنات الكهربائية المعجلة طاقه. هذه الطاقة عبارة عن أشعة كهرومغناطيسية. يمكن اعتبار الاشعة الكهرومغناطيسية حسب نظرية الكم (quantum theory)، سيل من كمات الطاقة او الفوتونات (Photons) يمتلك كل فوتون من الطاقة (E) حسب معادلة (1-1)، ما يعادل $E=h\nu$ حيث يمثل h ثابت بلانك $= 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.sec}$.

٢-٤ الطيف المستمر للأشعة السينية:

تتولد الأشعة السينية عندما يتباطأ بسرعة اي جسيم (دقيقة) مشحون له طاقة عالية. تستخدم الالكترونات عادة لهذا الغرض حيث تتولد الاشعة في انبوبة تحتوي على مصدر للالكترونات مع قطبين معدنيين. يتم تسليط فرق جهد عالي على طرفي القطبين. يسحب فرق الجهد هذا الالكترونات بسرعة نحو المصعد (anode) او الهدف (Target)، حيث تصطدم به الالكترونات بسرعة عالية جداً. تتولد الاشعة عند نقطة الاصطدام بكل الاتجاهات. يمكن ان تعطى الطاقة الحركية للإلكترونات عند الاصطدام بالآتي

$$K.E. = eV = \frac{1}{2} mv^2 \quad \dots\dots\dots(2-4)$$

v سرعة الالكترونات

m كتلة الالكترون ($9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$)

V فرق الجهد المعجل

e شحنة الالكترون ($1.6 \times 10^{-19} \text{ Coul}$)

تتحول اغلب الطاقة الحركية (K.E) للإلكترونات القاصفة للهدف الى حرارة واقل من 1% من هذه الطاقة تتحول الى أشعة سينية .

عندما تُحلل الأشعة الآتية من الهدف ، يتبين انها تحتوي على أطوال موجيه عديده . تتغير شدة الأشعة مع الطول الموجي وتعتمد كذلك على فولتية الانبوه . يبين الشكل (1-4) نوع المنحنيات الناتجة بين الطول الموجي والشدة النسبية . تبقى الشدة صفراً حتى طول موجي معين يسمى حد الطول الموجي القصير ("λ_{swl}" Short wavelength limit) ثم تزداد بسرعة الى قيمه قصوى ثم تنخفض تدريجياً حيث لا يوجد حد نهائى في جانب الطول الموجي الطويل . وعندما تزداد الفولتية المعجلة تزداد الشدة أيضاً ويقل الطول الموجي لكل من منطقة القيمة القصوى للشدة وحد الطول الموجي القصير . فإذا تم التركيز بالمنحنيات الانسيابية المتعلقة بالفولتية المسلطة التي مقدارها 20kv او أقل في حالة هدف من المولوبدونوم (Mo) . فالأشعة الممثل بهذه المنحنيات تسمى الأشعة المستمرة او البيضاء لأنها تتألف من العديد من الأطوال الموجية المستمرة كالضوء الابيض .

وإذا فرض ان بعض الالكترونات تفقد طاقتها بصدمه واحدة فتكون الطاقة العظمى للفوتون المتولد مساوية للطاقة الحركية المفقودة للإلكترون اي ان :

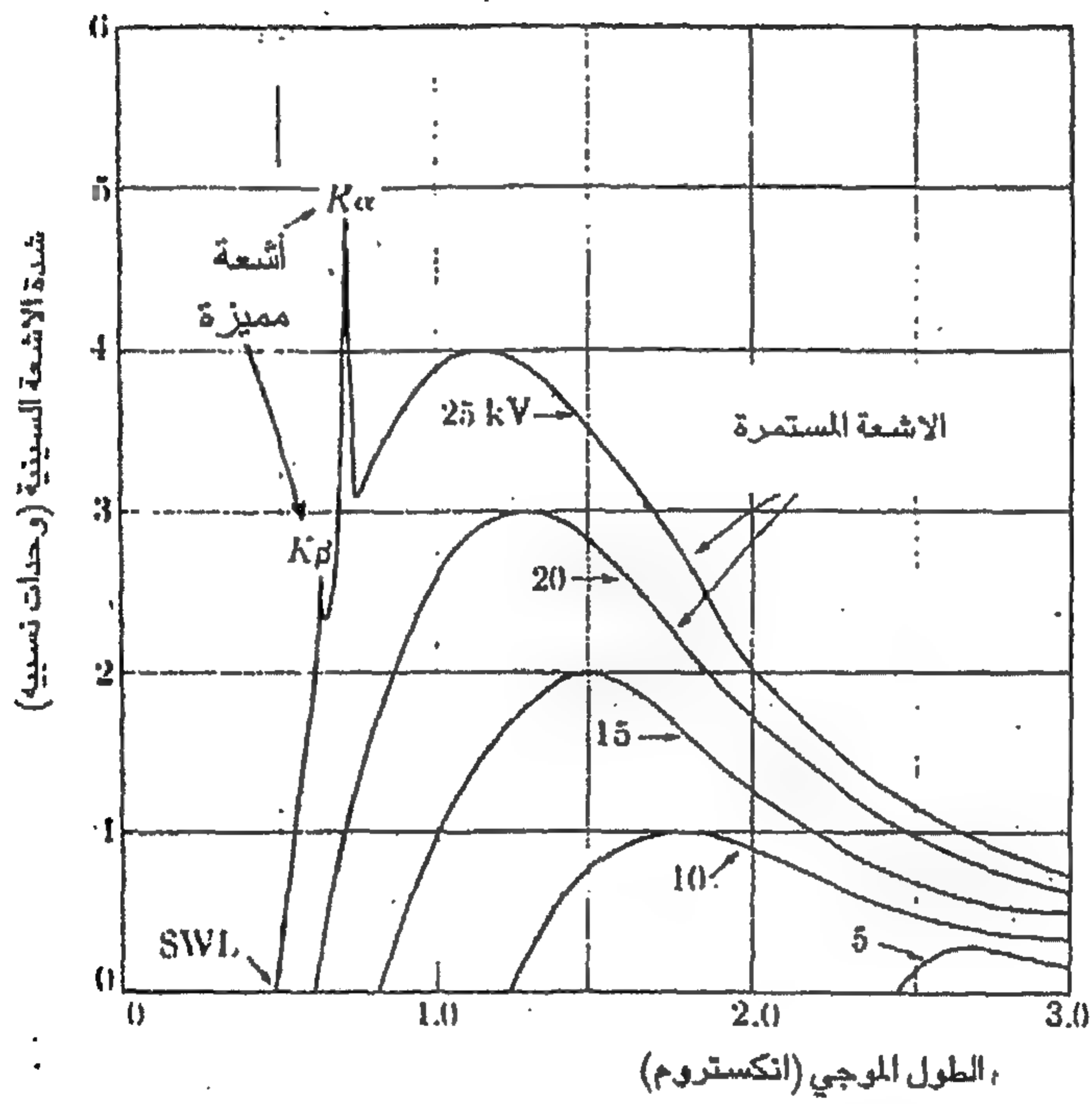
$$eV = h\nu_{\max} = h \frac{C}{\lambda_{\min}} \quad \dots\dots\dots(3-4)$$

أو

$$\lambda_{swl} = \lambda_{min} = \frac{hc}{eV}$$

وعند التعويض عن كل الثوابت نحصل على العلاقة 1-2 وهي :

$$\lambda_{swl} = \frac{12400}{V}$$



الشكل 1-4 طيف الأشعة السينية لهدف من المولوبدينوم

كدالة للفولتية المعجلة.

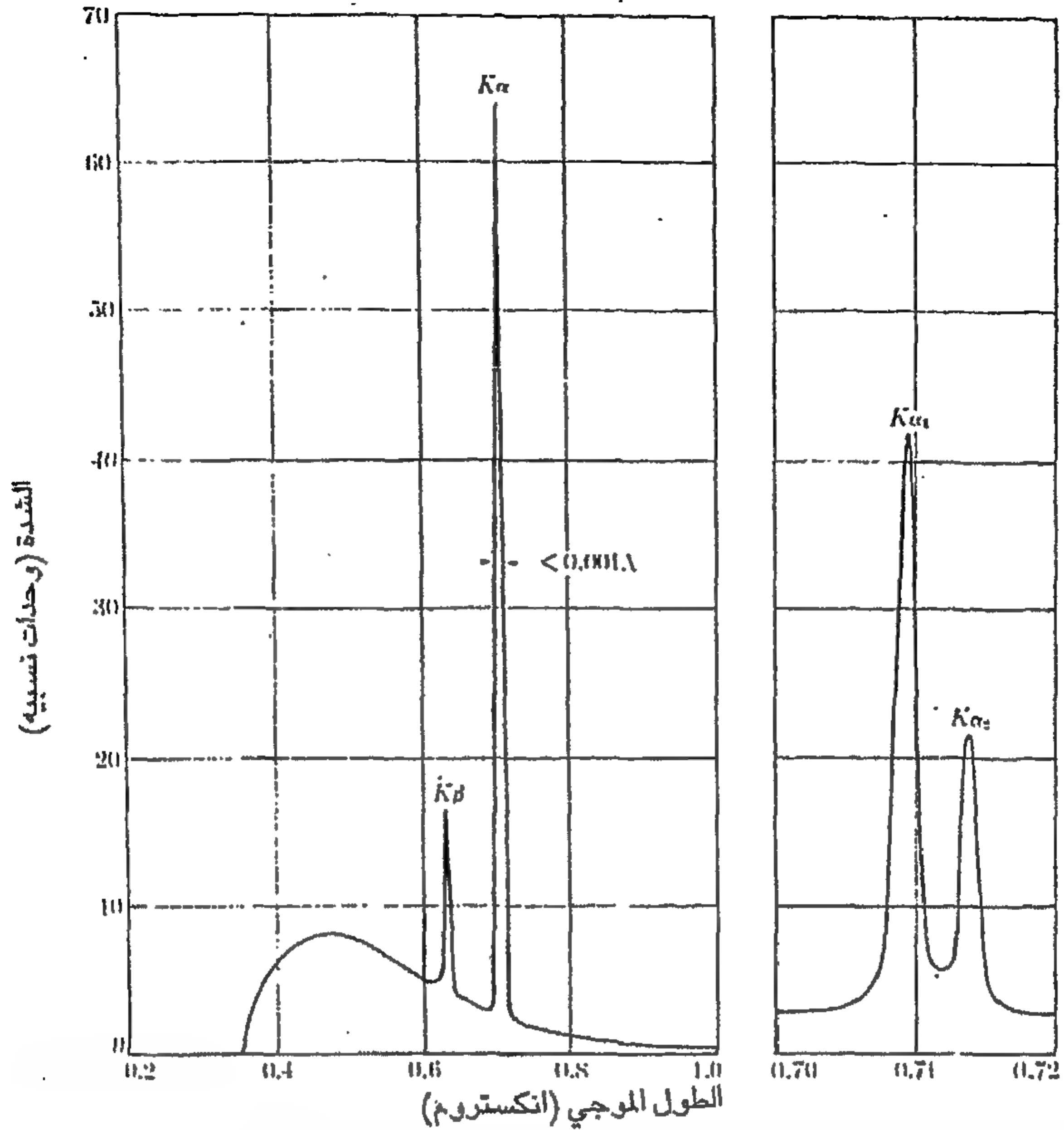
عندما تكون وحدات λ_{swl} بالانكستروم (Å) ووحدات V هي الفولت. لا تفقد الإلكترونات، بشكل عام، طاقتها عند أول صدمة مع ذرات الهدف وإنما تعمل عدة صدمات قبل أن تفقد طاقتها بصورة تامة. لذلك فإن الطول الموجي في المعادلة (1-2) اعلاه يمثل أقصر طول موجي يمكن الحصول عليه. حيث توجد أطوال موجية كثيرة جداً في طيف الأشعة المنبعثة ناتجة من تحول جزء من طاقة الإلكترون الصادم إلى أشعة عند كل صدمة حتى فقدان جميع طاقته بصدمات متعاقبة.

أما عند زيادة الفولتية المعجلة في الانبوبة عن حد ثابت (حسب معدن الهدف) فتبرز عند ذلك قمم حادة ذات أطوال موجية ثابتة تعتمد على طبيعة ذرات معدن الهدف (الشكل 4-2)، بحيث أن كل نوع من الذرات تبعث أشعة تختلف في الطول الموجي والشدة عن الذرات الأخرى، ولذلك سمي هذا الجزء من الطيف بالأشعة السينية المميزة (أي مميزه لنوع عنصر الهدف)، وبسبب هذه الخاصية يمكن استخدام الأشعة السينية كأداة كاشفة لنوع العنصر.

يتولد الطيف المميز عند اصطدام الإلكترونات المعجلة (السريعة) بالإلكترونات المدارات الداخلية لذرة الهدف وعليه فمن المحتمل أن تكتسب بعض الإلكترونات المدارية طاقة أكثر من الطاقة التي تربطها إلى ذراتها وبذلك تترك الذرة.

يبقى مكان هذه الإلكترونات خالياً ولذا قد ينتقل الكترون من المدارات الخارجية (الأكثر بعداً عن النواة) ليحتل مكان الكترون مفقود. إن الفرق في الطاقة لمستوى هذا الإلكترون المنتقل من المدار الخارجي والمستوى الذي انتقل إليه (المدار الداخلي) ينبعث على هيئة أشعة سينية مميزة (characteristic X - rays) خارج الذرة. وإذا فرض أن E تمثل الفرق في الطاقة بين المدارين عندئذ يكون طول موجة الأشعة المنبعثة هو :

$$\lambda = \frac{hc}{E}$$



الشكل 2-4 طيف عنصر المولوبدينوم عند فولتيه مقدارها 35kV بصورة تخطيطية. الشكل على

جهة اليمين يبين خطى $K\alpha$ بصورة منفصلة على تدريج مكبر للطول الموجي

حيث أن قيمة E تختلف باختلاف ذرة العنصر لذلك يكون طول موجة الأشعة

المنبعثة معتمداً على نوع العنصر.

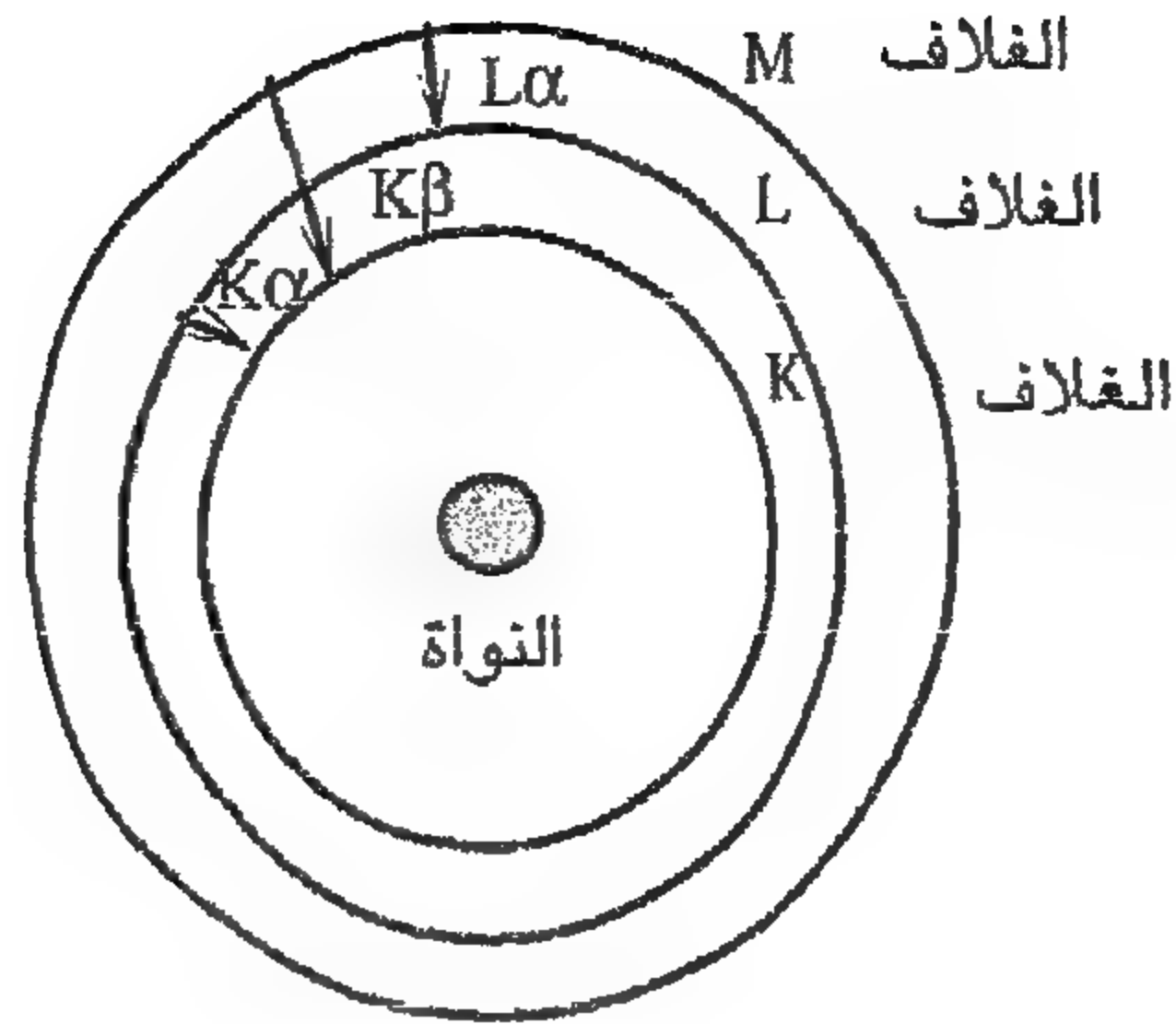
تأخذ E قيماً مختلفة محددية لذرة معينة، اعتماداً على المدارات التي تنتقل بينها

الكترونات الذرة وبذلك تولد طيفاً مميزاً له أطوال موجية معينة و منفصلة عن

بعضها بقدر فرق الطاقة بين الكترونات المدارات لتلك الذرة.

يبين الشكل (3-4) فكرة توليد الأشعة السينية المميزة نتيجة لإنتقال الكترونات

من مدار إلى آخر.



الشكل 3-4 تخطيط يمثل الانتقال الإلكتروني في الذرة.

عمليات انبعاث الأشعة السينية مؤشرة بالأسهم.

تدعى الأشعة السينية الناتجة عن احتلال إلكترون من المدار L مكان إلكترون في المدار K بـ $K\alpha$ وعند احتلال إلكترون من المدار M محل إلكترون في المدار K فتدعى الأشعة السينية $K\beta$ وبما أن احتمالية حدوث الظاهرة الأخيرة أقل من الأولى لذا كانت شدة $K\alpha$ أكبر بكثير من شدة $K\beta$. وحيث أن الفرق بين طاقة إلكترونات المدار M وإلكترونات المدار K أكبر من الفرق بين طاقة إلكترونات المدار L وإلكترونات المدار K لذا كان الطول الموجي لأشعة $K\beta$ أقصر مما هو عليه في أشعة $K\alpha$. وهناك أشعاعات مميزة أخرى سوف لن يتم التطرق إليها لعدم أهميتها في موضوع حيود الأشعة السينية:

٣-٤ امتصاص الأشعة السينية:

يتم توهين الأشعة السينية عند مرورها خلال سمك معين من المادة. يتم الامتصاص نتيجة لتفاعل هذه الأشعة مع ذرات المادة أو بالأحرى مع إلكترونات ذرات المادة. وقد دلت التجارب أن نقصاً نسبياً في شدة الأشعة (I)، عند مرورها

خلال اي مادة متجانسة، يتناسب مع المسافة التي تقطعها في المادة (X) (أو مع السمك) اي أن

$$-\frac{dI}{I} = \mu dx \quad \dots\dots\dots(4-4)$$

μ هو ثابت التناسب ويدعى معامل الامتصاص الخطي ويعتمد على نوع المادة وكثافتها والطول الموجي للأشعة السينية. ويمكن كتابة المعادلة اعلاه بعد التكامل بنفس صيغة المعادلة (3-1) اي ان

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}$$

I_0 : شدة الأشعة الساقطة و I_x شدة الأشعة النفاذة من المادة بعد مرورها خلال سمك مقداره X. وحيث ان معامل الامتصاص الخطي يعتمد على الكثافة (ρ)، كواحد من العوامل التي يعتمد عليها، لذلك كانت الكمية $\frac{\mu}{\rho}$ ثابت من ثوابت المادة لا يعتمد على الحالة الفيزيائية (صلب او سائل او غاز). ويدعى المقدار الاخير معامل امتصاص الكتلة، وهو المقدار الذي يذكر في الجداول عادة. ويمكن كتابة المعادلة الاخيرة اذن كالآتي:

$$I_x = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \rho x} \quad \dots\dots\dots(5-4)$$

ومن الضروري احياناً معرفة معامل امتصاص الكتلة لمادة تحتوي على أكثر من عنصر. يكون معامل امتصاص الكتلة مساوياً لمعدل الوزن النسبي لكل العناصر المكونه للمادة بغض النظر عن كون المادة خليط ميكانيكي او محلول او مركب كيميائي وفيما اذا كانت بحالتها الصلبة او السائلة او الغازية. فبإثنا فرضنا ان ω_1 و ω_2 ... هي الاوزان النسبية للعناصر 1 و 2 و... الموجودة في المادة، وأن $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_1$ و $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_2$... هي معاملات امتصاص الكتلة لهذه العناصر فيكون معامل امتصاص الكتلة للمادة هو $\frac{\mu}{\rho}$ اي ان:

$$\frac{\mu}{\rho} = \omega_1 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_1 + \omega_2 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_2 + \dots\dots\dots(6-4)$$

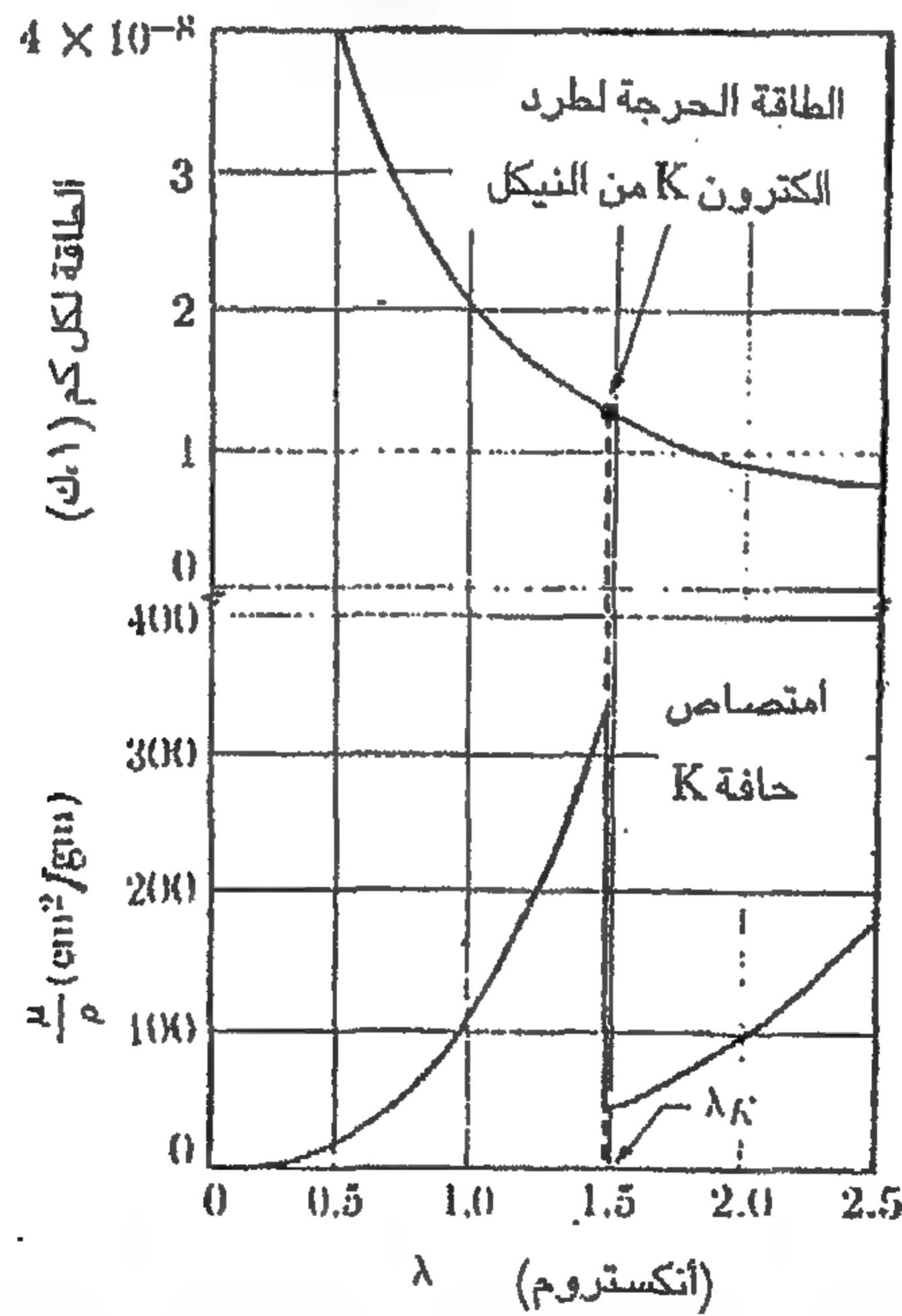
يعطي الأسلوب الذي يتغير به معامل الامتصاص مع الطول الموجي المفتاح لفهم

عملية تفاعل الأشعة السينية مع الذرات . يبين الشكل (4-4)، القسم الأسفل، تغير معامل امتصاص الكتلة للنikel كما دة ممتصة مع الطول الموجي وهذا الشكل نموذجي لكل المواد، يتألف المنحنى في الشكل (4-4) ، من جزئين متناظرين مفصولين بتغير حاد يدعى حافة الامتصاص (absorption edge) . يتغير معامل امتصاص الكتلة وبشكل تقريبي مع الطول الموجي في كل من جزئي المنحنى كالآتي:

$$\frac{\mu}{\rho} = k \lambda^3 Z \quad \dots\dots\dots(7-4)$$

k: ثابت تتغير قيمته لكل من جزئي المنحنى
Z: العدد الذري للمادة الماصة.

لذلك تكون الأشعة ذات الطول الموجي القصير أكثر قابلية على الاختراق وتسمى الأشعة السينية الشديدة (hard) في حين يتم امتصاص الأشعة السينية ذات الطول الموجي الطويل بسهولة وتسمى الضعيفة (Soft) .



الشكل (4-4) تغير طاقة فوتون الأشعة السينية ومعامل امتصاص الكتلة للنikel مع الطول الموجي.

تمتص المادة الأشعة السينية بأسلوبين متميزين :

١- بالاستطارة Scattering

٢- بالإمتصاص الحقيقي True absorption

يمثل معامل امتصاص الكتلة للمادة $\frac{\mu}{\rho}$ مجموع الإمتصاص بالأسلوبين تشابه استطارة الأشعة السينية بالذرات من عدة وجوه مع استطارة الضوء المرئي بدقائق الغبار في الهواء، حيث يحدث ذلك في كل الاتجاهات.

تعني الاستطارة اذن بالنسبة للأشعة السينية نقصاناً في قيمة الشدة بالاتجاه الأساس (اتجاه الشعاع الساقط) . اما الامتصاص الحقيقي فسببه الانتقال الالكتروني بين مدارات الذرة. وهو مشابه تماماً لما يحدثه الكترون عالي الطاقة عند اصطدامه بأحد الالكترونات المدارية الداخلية، على سبيل المثال الكترون المدار (K) ، فيطرده خارج الذرة ليؤدي الى انبعاث اشعة سينية مميزة. لذا يمكن ان يحدث الشيء نفسه عند سقوط فوتون الاشعة السينية بشرط ان يمتلك طاقة تعادل اقل طاقة كافية (w_k) لطرده الالكتروني من مداره . اي أن

$$w_k = h\nu_k = \frac{hc}{\lambda_k} \quad \dots\dots\dots(8-4)$$

λ_k تسمى حافة امتصاص المدار K .

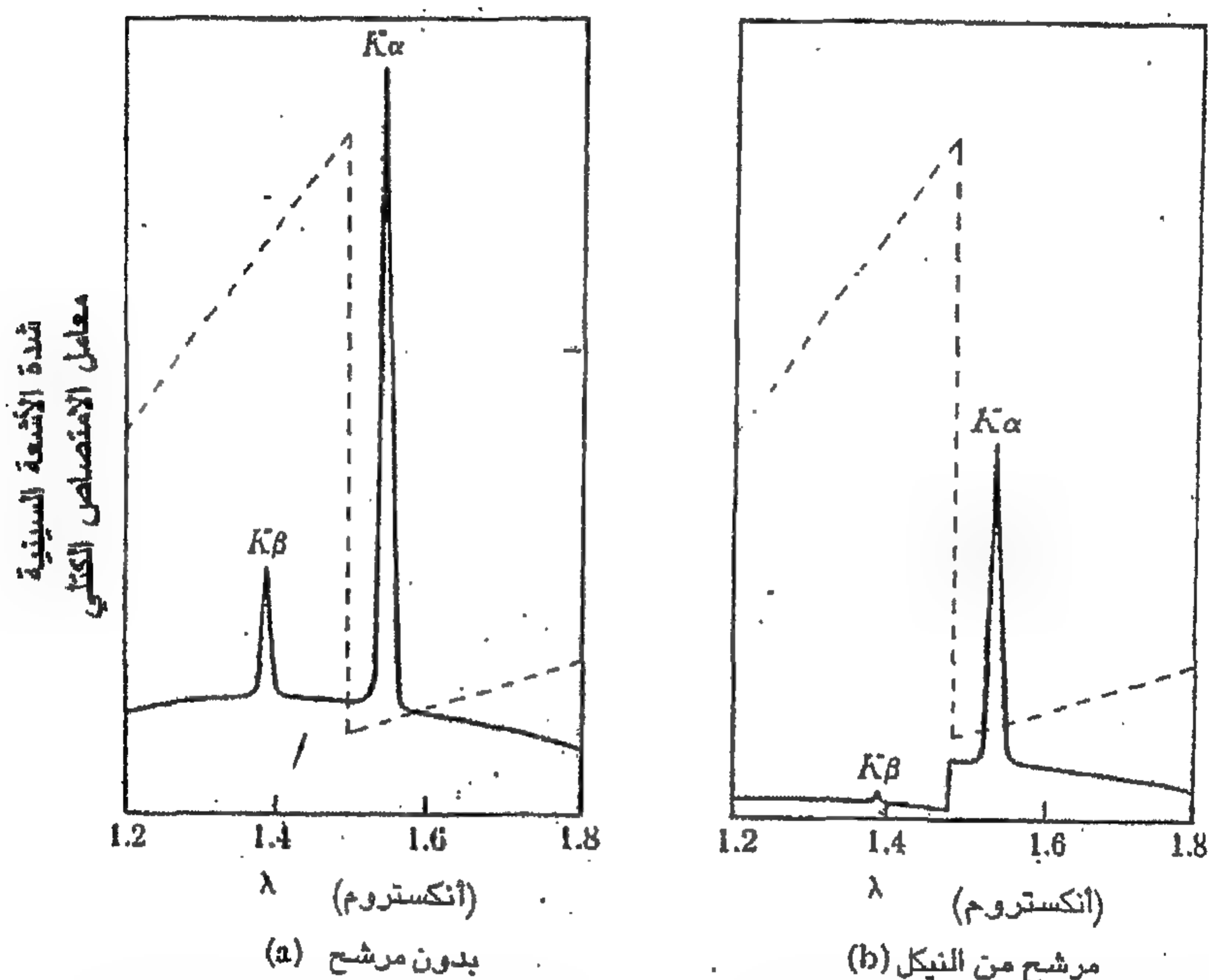
٤-٤ ترشيح الأشعة السينية:

نحتاج في دراسة الحيود الى أشعة أحادية الطول الموجي غالباً (Mono-chromatic Radiation) وذات شدة عالية نسبياً ومن هنا جاءت فكرة استعمال المرشح (Filter) للحصول بصورة عملية على مثل هذه الأشعة.

والمرشح عبارة عن صفيحة من مادة محددة لها علاقة بطبيعة مادة هدف (target) أنبوية الأشعة التي تتكون عنده الأشعة السينية والمرشح سمك معين ايضاً بحيث لا تنخفض شدة الأشعة كثيراً بعد مرورها بالمرشح.

يبين الشكل (5-4) جزء من طيف الأشعة السينية لهدف من النحاس (a) وقد استعمل النيكل كمرشح في (b). يمثل الخط المنقط تغير معامل امتصاص الكتلة للنيكل مع الطول الموجي.

ويشترط في مادة المرشح ان تكون حافة امتصاص K لمعدن المرشح واقعة بين طولي موجة اشعة القمتين $K\alpha$ و $K\beta$ لمعدن الهدف. اي يكون الطول الموجي لحافة امتصاص K للمرشح اقصر من الطول الموجي للقيمة $K\alpha$ وأطول من الطول الموجي للقيمة $K\beta$. كما ان العدد الذري لمادة المرشح يقل بواحد عن العدد الذري لمعدن الهدف.



الشكل (5-4) مقارنة بين طيف أشعة النحاس (a) قبل عملية الترشيح و (b) بعد مرور الأشعة خلال مرشح من النيكل. يمثل الخط المنقط معامل امتصاص الكتلة للنيكل.

يلاحظ من الشكل (4-5) ان العدد الذري للهدف (النحاس) هو (29) والعدد الذري للمرشح (النكل) هو (28). كما يلاحظ ان نسبة شدة الخط (القمة) $K\beta$ الى شدة الخط (القمة) $K\alpha$ قد قلت من $\frac{1}{9}$ تقريباً الى $\frac{1}{500}$ بعد عملية الترشيح اي اننا حصلنا تقريباً على أشعة احادية الطول الموجي. ومن الجدير بالذكر ان شدة الخط $K\alpha$ هي الأخرى قلت بحدود النصف بعد مرورها بالمرشح وهذا شيء غير مرغوب فيه طبعاً، لكنه لا يمكن تفاديه.

وإذا لم يمكن الحصول على رقيقة لمعدن المرشح المطلوب فيمكن استخدام اوكسيد ذلك المعدن وعلى شكل مسحوق يخلط بمادة رابطة وينشر على ورقة. يبين الجدول (4-1) بعض معادن الاهداف المستخدمة في انابيب الأشعة السينية عادة وسمك معادن المرشحات الملائمة لها.

جدول (4-1) مرشحات لمنع مرور أشعة $K\beta$

النسبة $\frac{I(K\alpha)}{I(K\alpha)}$ للنافذة للإساقطة	سمك المرشح الذي $\frac{I(K\alpha)}{I(K\beta)} = \frac{500}{1}$ يجعل في الأشعة النافذة منه mg/cm ² | mm	النسبة $\frac{I(K\alpha)}{I(K\beta)}$ للأشعة الساقطة	معدن المرشح	معدن الهدف
0.29	77 | 0.115	5.4	Zr	Mo
0.42	18 | 0.020	7.5	Ni	Cu
0.46	14 | 0.017	9.4	Fe	Co
0.48	12 | 0.017	9.0	Mn	Fe
0.49	10 | 0.015	8.5	V	Cr

٥-٤ أنبوبة الأشعة السينية:

لقد تم التنويه عن كيفية توليد الأشعة السينية بصورة مقتضية فيما سبق وأنها تتولد عندما تصطدم الكترونات عالية السرعة (معجلة) بهدف معدني. وبناء على ذلك فيجب ان تشتمل اي انبوبة لتوليد الأشعة السينية على الآتي:

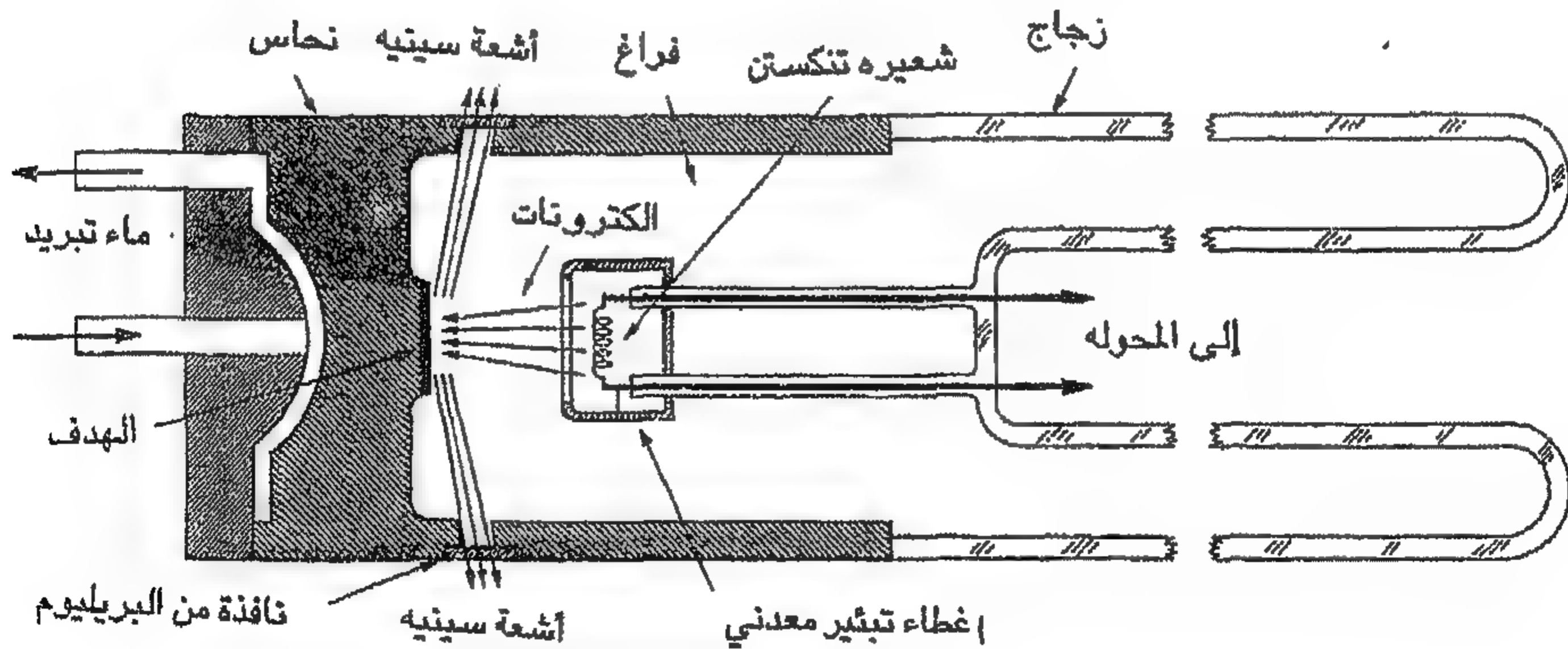
أ- مصدر لإطلاق الإلكترونات.

ب- فرق جهد عالي لتعجيل الالكترونات.

ج- هدف معدني.

وبما أن معظم الطاقة الحركية للإلكترونات تتحول الى حرارة عند الهدف، فيجب ان يتم تبريد الاخير بوسيلة ما، وعادة يكون التبريد بالماء، لمنع انصهاره. تحتوي جميع أنابيب الأشعة السينية على قطبين هما المصعد (anode) (وهو الهدف المعدني) والمهبط (cathode) ويكون فرق الجهد بينهما عالياً اي بحدود 30000 الى 50000 فولت لأغراض الحيود.

تحتوي أنبوبة الأشعة السينية المألوفة على شعيرة (filament) فيتم تسخين هذه الشعيرة لتزويد الأنبوبة بالإلكترونات . يبين الشكل (4-6) مقطع تخطيطي في مثل هذه الأنبوبة (الخاصة بالحيود) حيث تلاحظ الأجزاء الأساسية فيها.



الشكل (4-6) مقطع تخطيطي لأنبوبة الأشعة السينية.

٦-٤ الكشف عن الأشعة السينية:

هناك ثلاث وسائل للكشف عن هذه الأشعة هي:

أ- الشاشة المتألقة :

وتستخدم في هذه التقنية صفيحة مطلية بمادة متألقة كمادة كبريتيد الخارصين (Zinc sulfide) تحتوي كمية قليلة من النيكل. فعند سقوط الأشعة السينية عليها تتألق هذه المادة، أي تبعث أشعة مرئية، وفي حالة كبريتيد الخارصين يكون الضوء أصفر. ومع أن هذه الطريقة ليست ذات فائدة كبيرة في الكشف عن حزم الأشعة السينية الضعيفة إلا أنها مفيدة جداً في ضبط وتقويم الحزمة الرئيسية للأشعة المنبعثة من الجهاز.

ب- أفلام التصوير:

تستخدم أفلام خاصة بالأشعة السينية لتسجيل نمط الحيود ومن ثم استخراج المعلومات المطلوبة. تختلف تقنية تصنيع هذه الأفلام عن أفلام التصوير الاعتيادي. تعتمد درجة تأثر الفلم بالأشعة لتكوين الصورة على طول موجة الأشعة. يمكن من هذا أن نستنتج أن هناك أنواعاً مختلفة من الأفلام، يعتمد استخدام أيها منها على ظروف التجربة وخواص الأشعة السينية المستخدمة .

ج- العدادات Counters

وهي عبارة عن الأجهزة التي تحول الأشعة السينية إلى تيار كهربائي نبضي . يتناسب عدد هذه النبضات الكهربائية بوحدة الزمن مع شدة الأشعة السينية الداخلة إلى العداد. تستخدم في الوقت الحاضر ثلاث أنواع من العدادات هي:

١- العدادات التناسبية Proportional Counters

٢- العدادات الوميضية Scintillation Counters

٣- عدادات شبه الموصلات Semi conductor counters

٧-٤ احتراسات الوقاية من الأشعة السينية:

هناك نوعان من أنواع المخاطر قد يتعرض لها العاملون في مجال الأشعة السينية هما:

أ- مخاطر الصعقة الكهربائية الناتجة من العمل عند فولتية تعجيل عالية. من الممكن التقليل من شأن هذا الخطر بتصميم المعدات بصورة سليمة وذات تقنية عالية، كما أن الحذر والحيطه من قبل العاملين ضروريان أيضاً لتحاشي مثل هذا الخطر.

ب- مخاطر التعرض لجرعات عالية من الأشعة . لا يوجد عند الإنسان حاسة لتحسس مثل هذه الأشعة (كالأشعة السينية وأشعة كاما والأشعة فوق البنفسجية وغيرها) حيث انها أشعة مؤينة اي أنها تقتل الخلايا الحية، ولذا تتم مراقبة العاملون في هذا المجال بفحص الدم بصورة دورية للكشف عن كريات الدم البيضاء لأن تعرض الجسم لجرعة عالية تفوق المسموح به سيقتل هذه الكريات ومن ثم يقل عددها . تستخدم هذه الأشعة ايضاً في علاج خلايا السرطان والأورام الخبيثة الأخرى.

تمارين الفصل الرابع

- ١- ما هو تردد وطاقة الفوتون الواحد للأشعة السينية ذات الطول الموجي 1.54\AA و $(\text{Cu}\alpha)0.71\text{\AA}$ و $(\text{Mo}\alpha)$
- ٢- احسب سرعة الإلكترون وطاقته الحركية في أنبوبة الأشعة السينية عند فرق جهد معجل قدره 50kV . وما هو حد الطول الموجي القصير (λ_{swl}) .
- ٣- تستخدم الحواجز الرصاصية بكثرة لوقاية العاملين من الأشعة في مختبرات الأشعة السينية وتكون عادة بسلك (1mm) ، احسب معامل الاختراق $(\frac{I}{I_0})$ لهذه الحواجز في حالة الأشعة $(0.71\text{\AA})\text{Mo}\alpha$.
- ٤- صفيحة من الألمنيوم ذات سمك (1mm) ، تقلل شدة الأشعة السينية المخترقة لها 23.9% من قيمتها الأصلية. ما هو الطول الموجي للأشعة السينية هذه.
- ٥- أدى استخدام مرشح من النيكل في أنبوبة الأشعة السينية ذات هدف من النحاس، إلى الحصول على نسبة شدة بين $\text{ICu } k\alpha$ إلى $\text{ICu } k\beta$ مقدارها $(\frac{100}{1})$ للأشعة النافذة من المرشح، احسب سمك المرشح ومعامل الاختراق $(\frac{I}{I_0})$ للخط $\text{Cu } k\beta$. إذا علمت أن $(\frac{\mu}{\rho})$ للنكل لهذا الخط $(\text{Cu } k\beta)$ يساوي $286 \text{ cm}^3/\text{g}$.

الفصل الخامس

حيود الأشعة السينية

X - Ray diffraction

١-٥ المقدمة:

لقد تم استعراض خواص الأشعة السينية اضافة الى هندسة البلورات بصورة مقتضية والآن يمكننا الربط بين الاثنین ودراسة حيود الأشعة السينية والذي يعتبر التفاعل بين الاثنین. ومن خلال المعرفة المتراكمة حول البلورات وخاصة من قياس الزوايا بين سطوحها والتحليل الكيماوية إضافة الى الخواص الفيزيائية امكن الحدس بان البلورات متكونة من وحدات (ذرات او جزيئات) منتظمة الترتيب ومكررة وأن المسافة البينية بحدود (1\AA) ، بالرغم من قلة المعلومات عن البنية الداخلية لها في ذلك الوقت كما أنه في الوقت نفسه كانت هناك بعض الإشارات بأن الأشعة السينية هي اشعة كهرومغناطيسية في طبيعتها وان طولها الموجي بين 1\AA الى 2\AA . وفي نفس الوقت كانت ظاهرة حيود الضوء عند مروره في محرز (grat-ing) المسافة بين فتحاته تقارب الطول الموجي للضوء مفهومه بشكل جيد.

لقد تناول الفيزيائي الألماني فون لاوا (Von Laue) سنة 1912 هذه المسألة عندما قال اذا كانت البلورة فعلاً متكونة من ذرات منتظمة الترتيب فيمكن أن تكون مراكز لاستطارة الاشعة السينية وإذا كانت الاشعة السينية ذات طبيعة كهرومغناطيسية وأن طولها الموجي يساوي تقريباً المسافة البينية للذرات في البلورة عندئذ يمكن ان تحاد الأشعة السينية بواسطة البلورات.

لقد تم اجراء تجارب للملاحظة حيود الاشعة السينية واستخدمت بلورات كبريتات

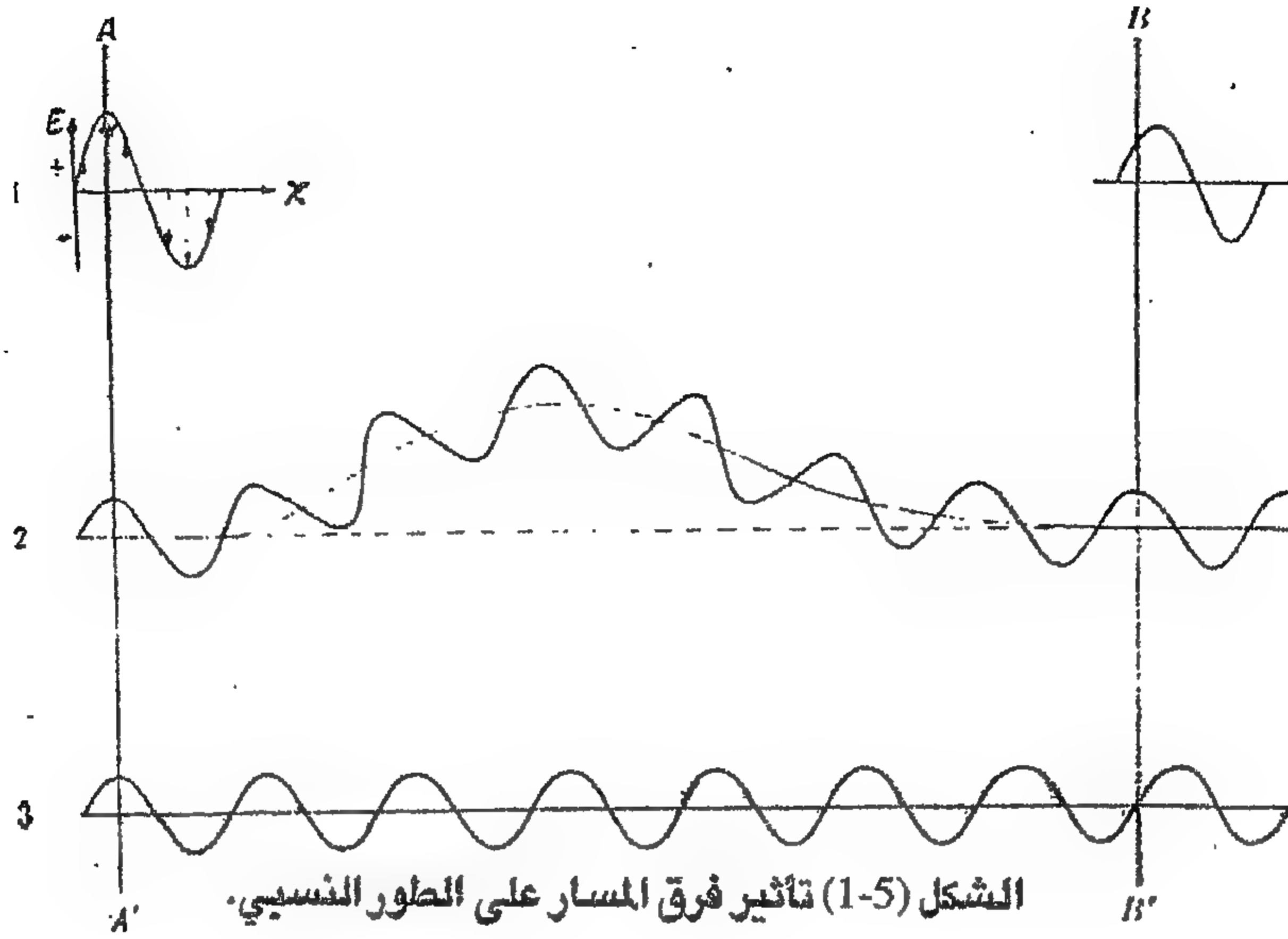
النحاس مع حزمة ضيقة من الأشعة السينية وعلى لوح تصوير (فوتوغرافي). وفعلاً نجحت بعض هذه التجارب وتم تسجيل نمط حيود الأشعة السينية بشكل لا يقبل الشك وبذلك تم اثبات ان الأشعة السينية ذات طبيعة كهرومغناطيسية وأن الذرات مرتبة بشكل منتظم ومعاد في البلورات.

لقد وضع العالم الانكليزي براك (Bragg) وابنه الشروط الخاصة بالحيود بشكل رياضي بسيط. لقد حددا البنى البلورية لعدة بلورات على سبيل المثال، NaCl و KI ، KBr والتي كانت ذات بنى واحدة هي بنية NaCl وتعتبر هذه اول دراسة كاملة لتعيين بنى البلورات.

ازدادت فيما بعد تطبيقات الحيود واستخدمت في مجالات عدة كهندسة المعادن والمواد وفيزياء الحالة الصلبة والكيمياء وغيرها.

٢-٥ الحيود Diffraction:

يحدث الحيود عندما يكون هناك فرق في الطور (phase difference) بين موجتين او أكثر تنتشران في نفس الاتجاه تقريباً. ومن المهم أخذ فكرة ولو بسيطة عن العلاقات الطورية بين الموجات. لنأمل حزمة من الأشعة السينية مثل الحزمة (الموجه) (1) في الشكل (1-5) والمنتشرة من اليسار الى اليمين. لنفترض ، للتبسيط، ان الحزمة مستوية ومستقطبة ليتمكننا رسم متجه المجال الكهربائي للموجه (E) دائماً في مستوي واحد. يمكن ان نتصور ان هذه الحزمة متكونة من جزئين متساويين ، الشعاع 2 والشعاع 3 ، لكل منهما نصف سعة الحزمة 1. ويقال لهذين الشعاعين انهما في حالة طورية متطابقة (in phase) تماماً عند جبهة الموجه (wave front) AA' ، اي ان متجهي مجالهما الكهربائي لهما نفس القيمة والاتجاه عند اي لحظة واية نقطة على المحور X عند قياسهما باتجاه انتشار الموجه. تعرف جبهة الموجه بأنها السطح العمود على اتجاه انتشار الموجه.



تصور الآن ان الشعاع 3 سار بخط مستقيم لكن الشعاع 2 انحرف بطريقة ما وسار بخط منحني قبل ان يلتقي بالشعاع 3 . لنتفحص الحالة الطورية عند جبهة الموجه BB' ، فالمتجه الكهربائي للشعاع 2 عند قيمته العظمى عند اللحظة المبينه، لكنه يساوي صفراً بالنسبة للشعاع 3 . اذن فالشعاعين لهما طورين مختلفين اي ان في طورهما اختلاف (out of phase) . فإذا تم جمع هاتين المركبتين (2 و 3) فسنجد ان الحزمة 1 لها الحالة المبينه على الجهة العليا اليمنى من الشكل. فإذا كانت سعة كل من الشعاعين 2 و 3 لهما قيمة مقدارها وحدة واحدة فسعة الحزمة 1 عند اليسار لها وحدتين اثنتين وأن سعتها عند حالتها في الجهة اليمنى 1.4 من الوحدات اذا كانت E تتغير جيبياً مع المحور x .

ومما تقدم يمكن استنتاج الآتي:

١- يؤدي الفرق في طول مسارات الأشعة الى فرق في الطور.

٢- يؤدي الفرق في الطور الى فرق في سعة موجة الأشعة.

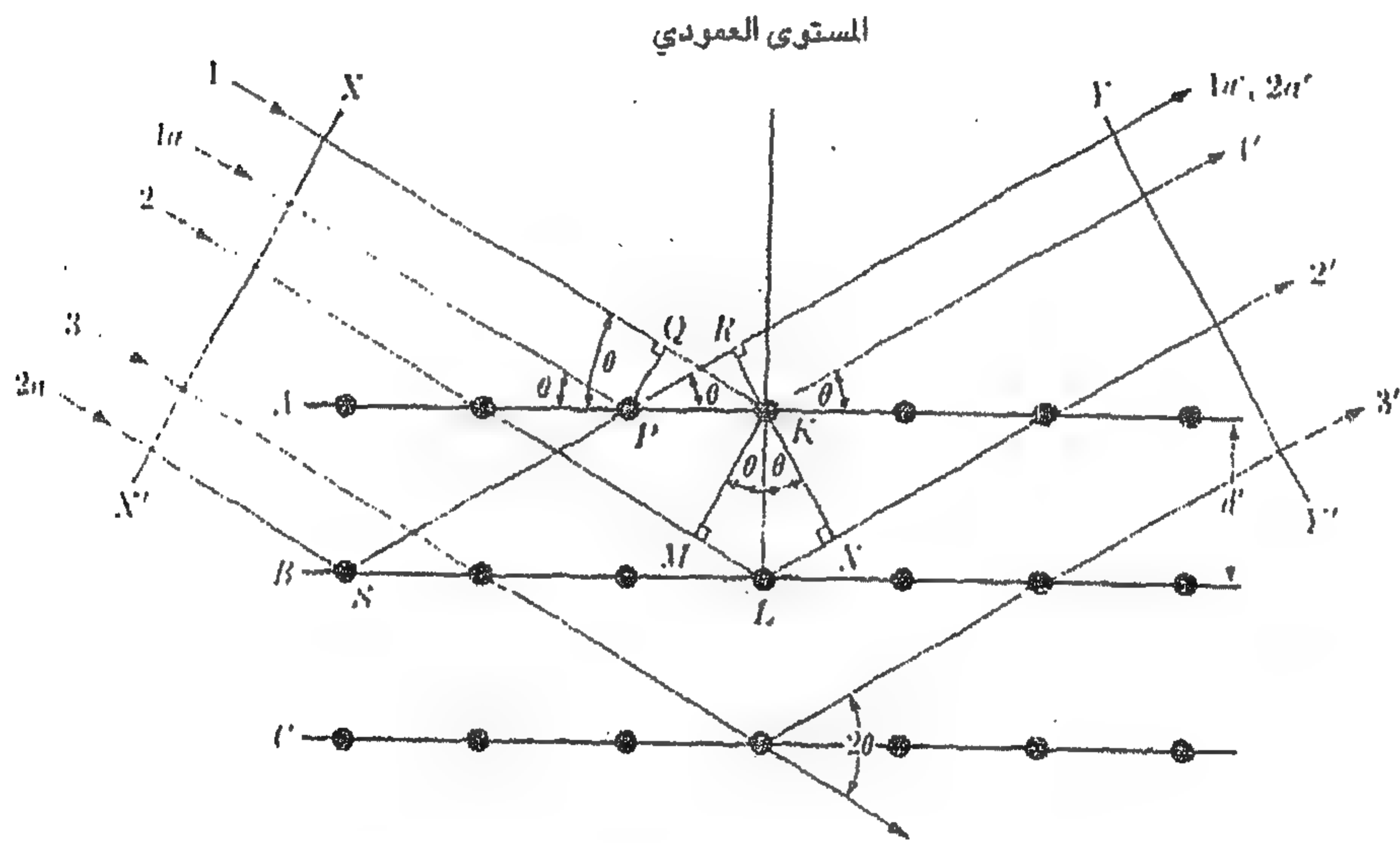
كلما كان الفرق في المسار أكبر كان الفرق في الطور أكبر، وحيث أن الفرق في المسار، والذي يقاس بالطول الموجي، يساوي تماماً الفرق في الطور فإنه يقاس بالطول الموجي أيضاً. ولو فرضنا أن المسار المنحرف للشعاع 2 في الشكل (1-5) أطول بمقدار ربع الطول الموجي مما هو مبين في الشكل، لكان الفرق في الطور نصف الطول الموجي. فيكون الشعاعان 2 و 3 في حالة عدم توافق طوري تماماً عند جبهة الموجه BB' وبعدها. وهكذا سوف يمحو كل منهما الآخر، لأن المتجه الكهربائي لكل منهما إما أن يكون صفراً أو لهما نفس المقدار ولكن باتجاهين متعاكسين. أما إذا كان مقدار الفرق في مساري الموجتين أكثر مما هو مبين في الشكل بثلاثة أرباع الطول الموجي فسيكون الفرق الطوري بين الشعاعين بمقدار طول موجي واحد تماماً، وهي الحالة التي تتطابق تماماً مع ما لو كان الشعاعان في حالة تطابق طوري تام لأن الموجتين في كلا الحالتين سوف تتحدان لتكوين شعاع سعته وحدتين اثنتين تماماً مثل الشعاع الأساس. يمكن الاستنتاج أن الشعاعين يكونان في حالة تطابق طوري تام كلما كان الفرق في طول مساريهما صفراً أو عدداً صحيحاً من الأطوال الموجية.

تنشأ بصورة طبيعية الفروق في أطوال مسارات الأشعة عندما نتأمل الكيفية التي تحيد بها البلورة الأشعة السينية. يبين الشكل (2-5) مقطع في بلورة تترتب ذراتها على مجموعة من المستويات المتوازية A و B و C و D والتي تكون عمودية على مستوى الورقة ومسافتها البينية (d). وعلى فرض أن الأشعة السينية متوازية تماماً وذات طول موجي أحادي هو (λ) وساقطة على البلورة بزاوية مقدارها (θ) تدعى زاوية براك (Bragg angle) وهي الزاوية المتولدة بين الشعاع الساقط ومستوى البلورة المحدد.

والمطلوب الآن معرفة هل أن هذه الأشعة سوف تحاد من قبل البلورة وتحت أية ظروف يحدث الحيود. يمكن تعريف الشعاع المحاد بأنه الشعاع المتكون من عدد

كبير من الأشعة المستطارة في الأساس ولا يتضمن اي تفاعل جديد بين الذرات والأشعة السينية، وبما ان الذرات تستطير الأشعة السينية في كل الاتجاهات، فسوف يتضح فيما بعد ان حزم الأشعة المستطارة في بعض الاتجاهات ستكون في حالة تطابق طوري تام وستقوي كل واحدة منهما الاخرى لتوليد الحزم المحادة.

ان الشعاع المحاد المتولد في الظروف المبينه في الشكل (2-5) هو الشعاع الذي تكون زاوية الانعكاس بينه وبين مستوى البلورة (θ) والتي تساوي زاوية السقوط.



الشكل (2-5) حيود الأشعة السينية بواسطة بلوره.

لو تأملنا الآن الشعاع 1 و 1a في الحزمة الساقطة، فإنهما ستصدمان الذرتين K و P في المستوى الأول للذرات ومن ثم تستطير في كل الاتجاهات ستكون الحزم المستطيرة في الاتجاهين 1a' و 1' فقط في حالة تطابق طوري تام ويمكنها ان

تقوي أحدهما الأخرى، لان الفرق في طول مساريهما بين الجبهتين XX' و YY' يساوي صفراً اي ان

$$QK - PR = PK \cos \theta - PK \cos \theta = 0$$

وهكذا يكون حال كل الحزم المستطارة من قبل الذرات في المستوى الأول وفي الاتجاه الموازي للشعاع ($1'$) ومن ثم تتحد لتكون الحزمة المحادة. وينطبق هذا على كل المستويات بصوره منفصلة وتستطير الذرتان K و L ، على سبيل المثال، الشعاعين 1 و 2 والفرق بين مساري الشعاعين ($1K1'$) و ($2L2'$) هو:

$$ML+LN = d \sin \theta + d \sin \theta \quad \dots\dots\dots(1-5)$$

وهو نفس الفرق في المسار بين الشعاعين المستطارين من قبل الذرتين S و P وفي الاتجاه المبين لأنه لا يوجد فرق في طول المسار للأشعة المستطارة من قبل الذرات الواقعة في نفس المستوى، فسيكون الشعاعان المستطاران ($1'$ و $2'$) في حالة تطابق طوري تام إذا كان الفرق في المسار يساوي عدد صحيح (n) من الأطوال الموجبة او أن

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \dots\dots\dots(2-5)$$

وأول من استنتج هذه العلاقة هو العلامة (W.L.Bragg) ولذا عُرِفَت فيما بعد بقانون براك (Bragg's Law). ويحدد هذا القانون الشرط الأساس لحدوث الحيود. وتمثل n عدد صحيح يسمى مرتبة الحيود وهي تساوي عدد الأطوال الموجية الموجودة في الفرق بين مسارات الأشعة المستطارة بوساطة المستويات المتجاورة. أي أن:

$$n= 1,2,3,4,\dots\dots\dots$$

لذلك تكون جميع الاشعة المستطارة من الذرات في كل المستويات في حالة توافق طوري تام ويقوي كل شعاع منها الآخر لتكوين الحزمة المحادة بالإتجاه المعين ،

وتكون الأشعة المستطارة في الاتجاهات الأخرى في حالة عدم توافق طوري ولذا يمحو كل شعاع منها الآخر.

يمكن تمييز أكثر من نوع من أساليب الإستطارة:

١- بواسطة الذرات المترتبة عشوائياً في المادة. فتحدث الاستطارة في كل الاتجاهات وتكون ضعيفة.

٢- بواسطة الذرات المترتبة بانتظام في المادة وتقسم الاستطارة هنا الى حالتين:

أ- فاستطارة الأشعة، في اتجاهات قليلة ومحدودة والتي تفي بقانون براك تسمى حيود اي يحدث تداخل تقوية.

ب- لا توجد استطارة للأشعة في اغلب الاتجاهات، التي لاتفي بقانون براك لأن الحزم المستطارة سوف تلغي كل واحدة منها الأخرى.

٣-٥ قانون براك Bragg's Law

هناك حقيقتان هندسيتان من المهم تذكرهما:

١- يكون الشعاع الساقط والعمود المقام على مستوى الانعكاس والشعاع المحاد في مستوى واحد دائماً.

٢- تساوي الزاوية بين الشعاع المحاد والشعاع النافذ 2θ دائماً، وتعرف هذه الزاوية بزاوية الحيود وهذه الزاوية (2θ) هي التي تقاس تجريبياً. يمكن الاستنتاج من قانون براك ان الحيود لا يحدث الا إذا كان الطول الموجي للأشعة في نفس مقدار مرتبة المسافة المعادة بين مراكز الاستطارة (الذرات) وكالاتي:

$$\frac{n\lambda}{2d} = \sin \theta < 1 \quad \dots\dots\dots(3-5)$$

اذن يجب ان تكون ($n\lambda$) اقل من ($2d$). ان أصغر قيمة تأخذها (n) هي (1) عند الحيود. لذلك تكون $\lambda < 2d$.

تكون قيمة المسافة (d) بين المستويات الذرية في اغلب البلورات بحدود 3\AA أو أقل أي أن λ لا يمكن أن تزيد على 6\AA . ولذلك لا يمكن للبلورة أن تحيد الاشعة فوق البنفسجية ذات الطول الموجي 500\AA على سبيل المثال. ومن الجانب الآخر، إذا كانت λ صغيرة جداً فزوايا الحيود ستكون صغيرة وتكون أكثر ملائمة للقياس.

يمكن كتابة قانون براك كالآتي:

$$\lambda = 2 \frac{d}{n} \sin \theta \quad \dots\dots\dots(4-5)$$

وبما أن $n=1$ أو 2 أو 3 وهي تمثل مرتبة الحيود أو الحيود من المستوى المحدد بأدلة hkl والذي يمثل مرتبة الحيود ايضاً ولذا يمكن كتابة قانون براك كالآتي:

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad \dots\dots\dots(5-5)$$

وتكون قيمة d_{hkl} هنا حسب مقدار أدلة d_{hkl} لتلك المجموعة من المستويات.

٤-٥ اتجاهات الحيود Diffraction Directions

يمكن تعيين اتجاهات الحيود الممكنة أي قيم الزوايا (2θ) الممكنة بالرجوع الى الشكل (3-5) نلاحظ انه يمكن الحصول على عدة زوايا حيود هي $2\theta_1$ و $2\theta_2$ و $2\theta_3$ من المستويات (100) باستخدام شعاع ساقط بزوايا محددة هي θ_1 و θ_2 و θ_3 ... لتكوين مراتب حيود اولى وثانية وثالثة وهكذا. إلا أن الحيود يمكن أن يحدث عند المستويات (110) و (111) و (213) وهكذا. ولذا يلزم استخدام علاقة عامة لهذا الغرض وكالآتي:

لنفرض ان البلورة المدروسة ذات بنية مكعبة فيكون :

$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2)}{a^2}$$

كما مر سابقاً، وبتعويض قيمة (d) في معادلة براك (5-5) ينتج أن :

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4a^2} (h^2 + k^2 + l^2) \quad \dots\dots\dots (6-5)$$

تتنبأ هذه المعادلة بكل زوايا براك الممكنة، التي يمكن حدوث الحيود عندها، من المستويات (hkl) لبلوره مكعبة ذات ضلع (حرف) طوله (a) . فعلى سبيل المثال، تصبح المعادلة الاخيرة (6-5) كالآتي :

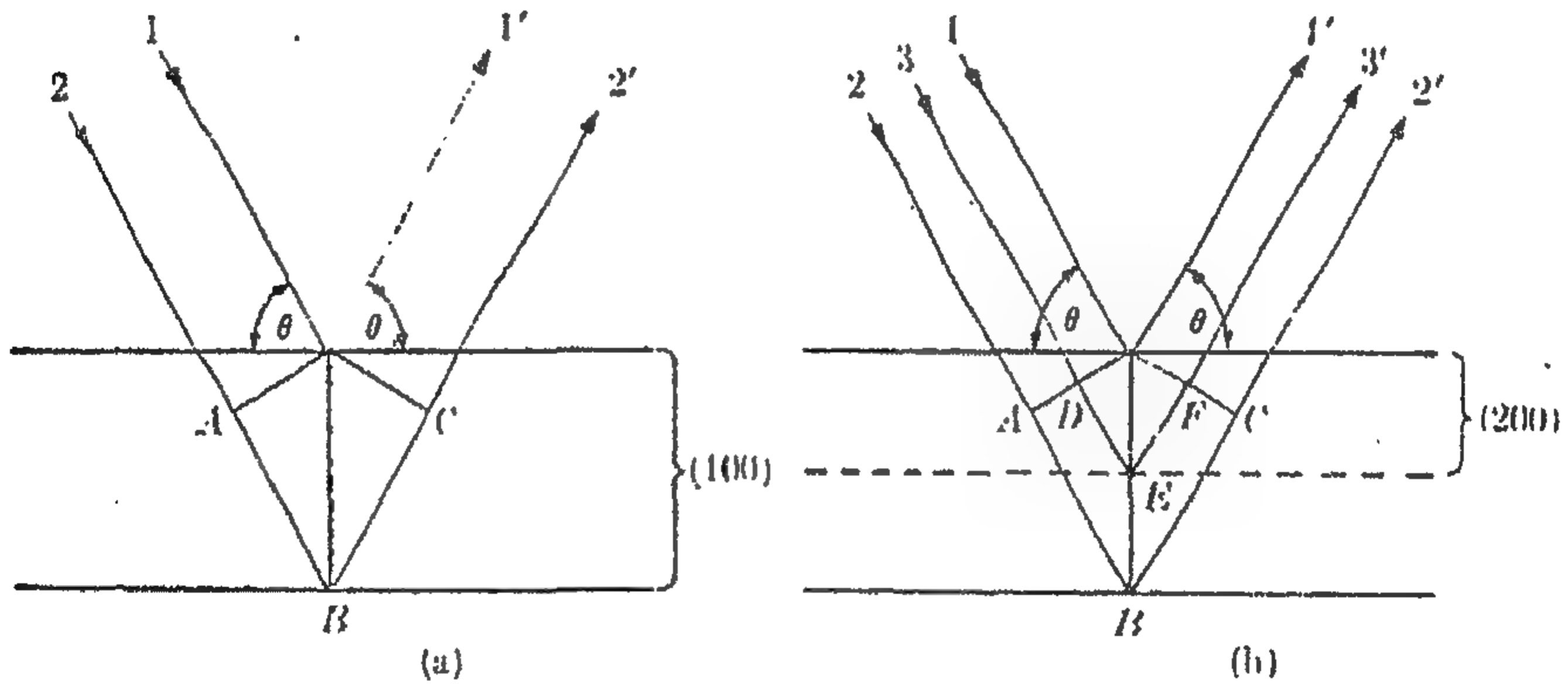
$$\sin^2 \theta_{110} = \frac{\lambda^2}{4a^2} \quad \dots\dots\dots (7-5)$$

أما عند كون البلورة رباعية (Tetragonal) لها الضلعين a و c فتكون معادلتها العامة :

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4} \left(\frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \right) \quad \dots\dots\dots (8-5)$$

وهكذا بالنسبة لبقية الانظمة البلورية.

يتبين مما تقدم ان اتجاهات الحيود تتعلق بشكل وحجم الخلية الاساسية فقط وهذا يعني امكانية دراسة البلورة المجهولة بقياس اتجاهات الاشعة المحادة اي تعيين شكل وحجم الخلية الأساسية.



الشكل (3-5) تكافؤ (a) الانعكاس 100 ذو المرتبة الثانية و (b) الانعكاس 200 ذو المرتبة الأولى .

وكما سنرى لاحقاً فإن شدة الحزم المحادة تعين مواقع الذرات في الخلية الأساسية اي أنه يلزم قياس شدة الحزم إذا أريد الحصول على معلومات حول مواقع الذرات . كما تنخفض شدة الحزم المحادة في العديد من الأنظمة البلورية الى الصفر في بعض الاتجاهات اي أنه لا توجد حُزم محادة كما تتنبأ به المعادلتان (5-7) و (5-8) . ولذا فإن هاتين المعادلتين وامثالهما تتنبأ بكل الحزم المحادة الممكنة .

٥-٥ طرائق الحيود Diffraction methods

يحدث الحيود كلما تحقق قانون براك ($2d \sin \theta = \lambda$) . حيث تضع هذه المعادلة شروطاً صارمة لكل من λ و θ ولأية بلورة . ولذا وضعت طرائق محددة تم بموجبها تغيير إما λ أو θ خلال التجربة ليتمكن تحقيق قانون براك . فهناك ثلاث طرائق حيود رئيسية يمكن تحديدها مع ظروفها وهي:

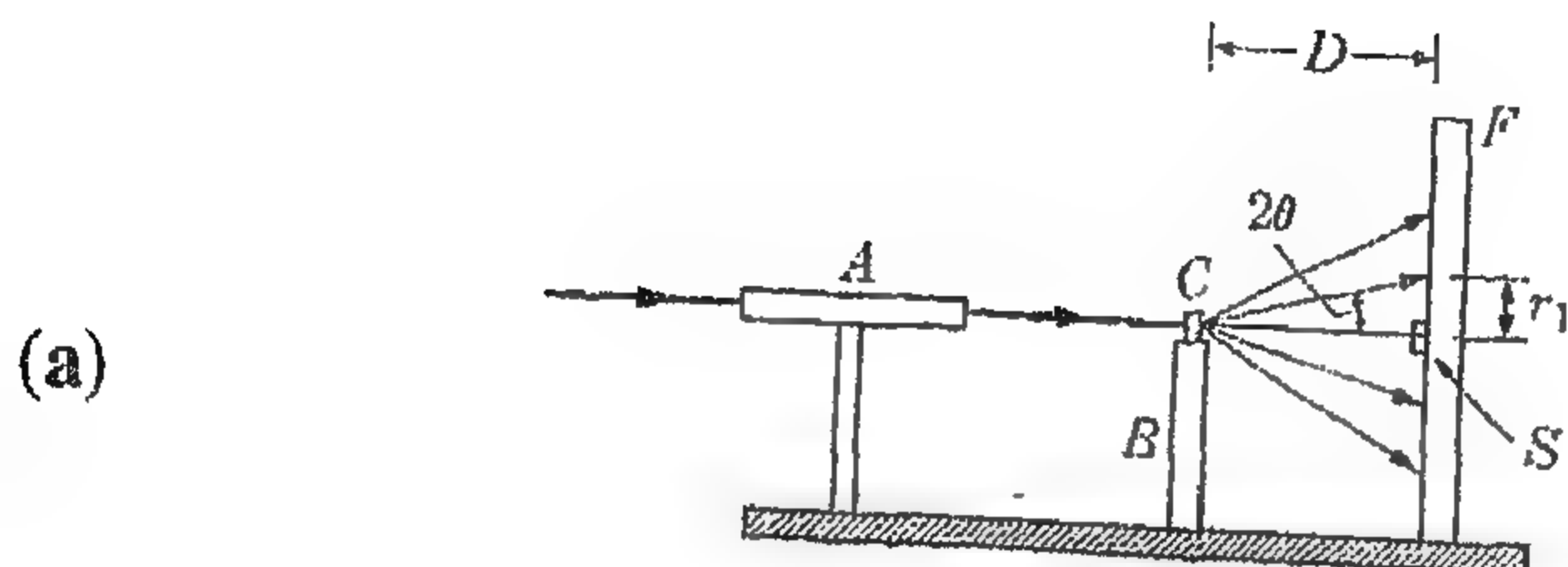
زاوية الحيود θ	الطول الموجي λ	
ثابتة	متغير	١- طريقة لاوا
متغيرة جزئياً	ثابت	٢- طريقة تدوير البلورة
متغيرة	ثابت	٣- طريقة المسحوق

٥-٥-١ طريقة لاوا Laue method

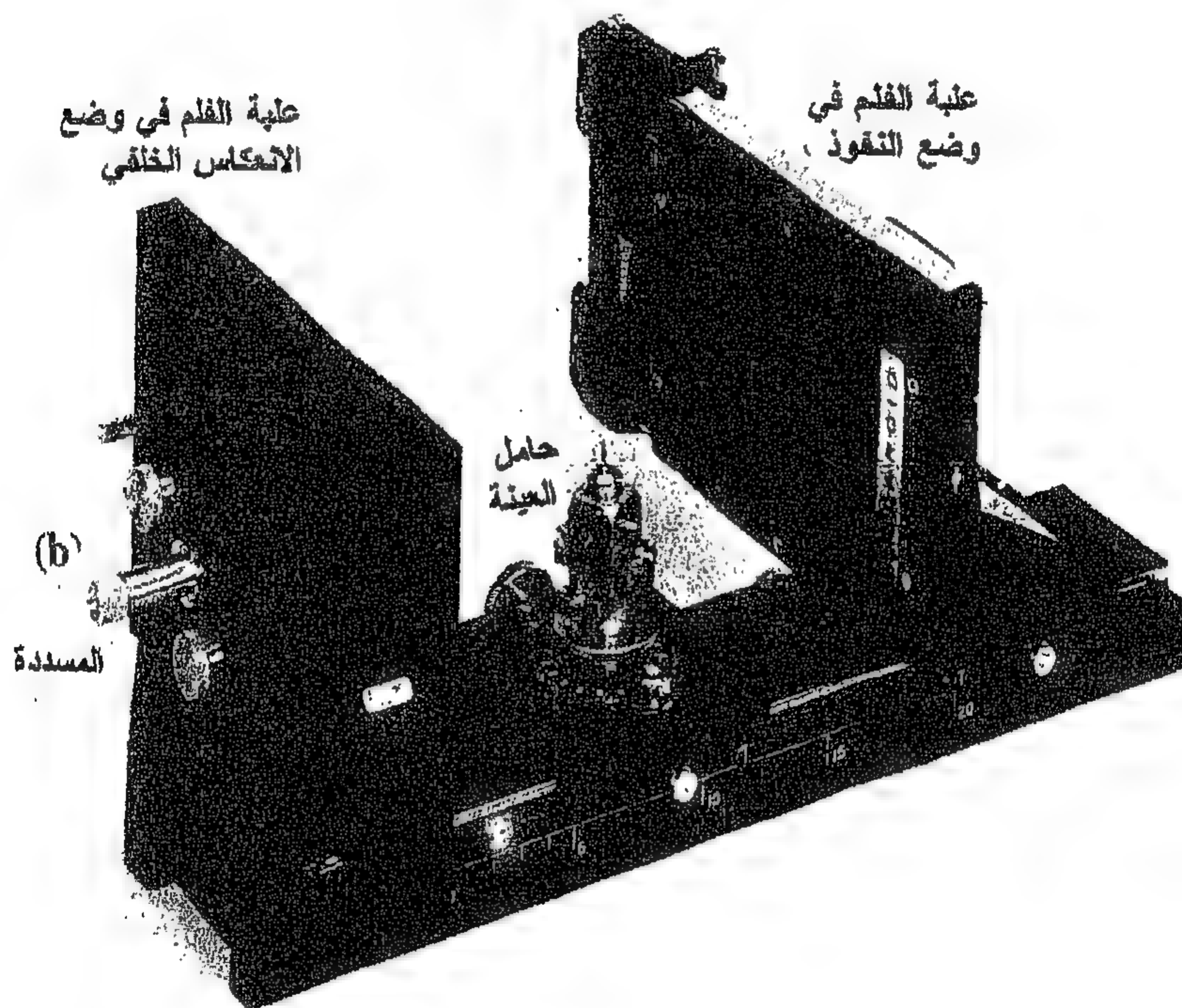
وتعتبر اول طريقة لدراسة الحيود وسميت باسم اول من قام بأجرائها وهو فون لاوا (Von Laue). تم في هذه الطريقة استخدام حزمة من الأشعة السينية المستمرة (البيضاء) الخارجة مباشرة من انبوبة الأشعة واسقطت على بلوره احادية . وحيث ان زاوية براك (θ) ثابتة لكل مجموعة من مستويات البلورة ، فكل مجموعة منها تعمل على حيود طول موجي معين يلائمها بحيث تحقق قانون براك لقيم (d) و (θ) المحدتين . وهذا يعني ان كل حزمة حيود لها قيمة مختلفة من الطول الموجي . يوجد في هذه الطريقة حالتان اعتماداً على الأوضاع النسبية لمصدر الاشعة والبلوره والفلم هما:

أ- طريقة الحيود بالنفوذ Transmission method

وفيها يكون موضع العينة، التي تكون بهيئة بلورة منفردة (Single crystal) بين الفلم ومصدر الأشعة يوضح الشكل (4-5) التقنية المستخدمة في هذه الطريقة.



(a)



(b)

الشكل (4-5) (a) تخطيط كاميرا لاوا للنفوذ و (b) صورة كاميرا لاوا لطريقة النفوذ وطريقة الانعكاس الخلفي في نفس الوقت وقد وضع النموذج بين حاقظتي القلمين .

أما زاوية براك θ فيمكن حسابها لكل نقطة (حزمة) حيود كآتي:

$$\tan 2\theta = \frac{r_1}{D} \quad \dots\dots\dots(9-5)$$

حيث تمثل :

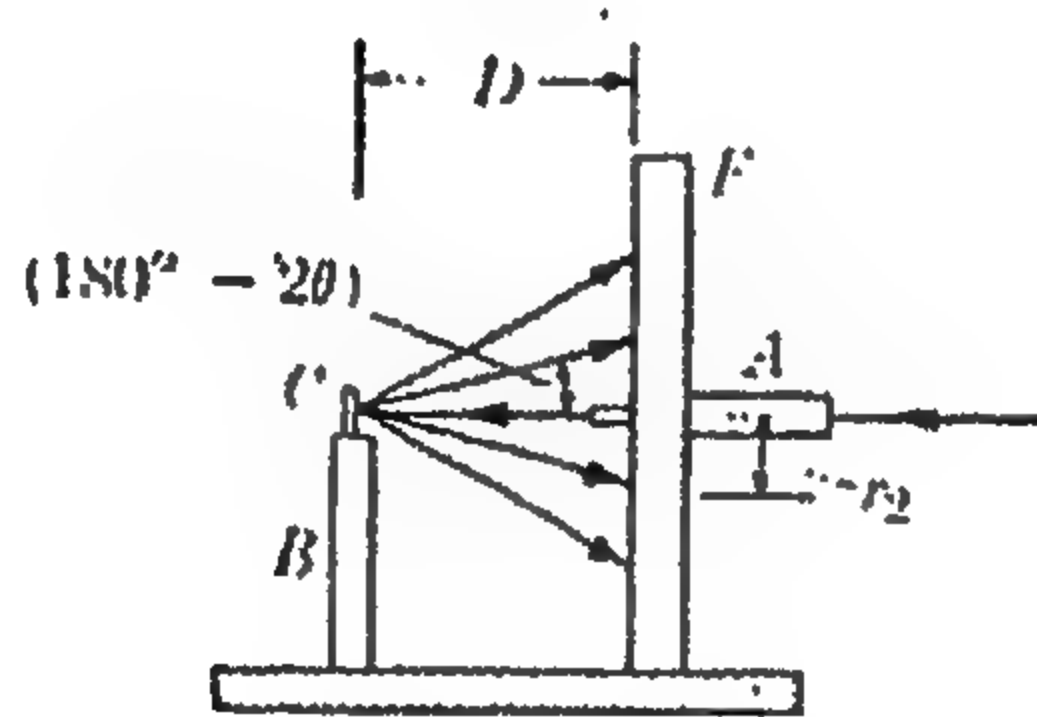
r_1 المسافة من نقطة الحيود الى مركز الفلم (نقطة سقوط الشعاع النافذ الأساس) و D المسافة بين النموذج والفلم (وعادة ما تكون 5 cm) . وفي هذه التقنية تكون العينة رقيقة نسبياً.

ب- طريقة الحيود بالانعكاس الخلفي Back Reflection method

وفيها يكون موضع الفلم بين مصدر الاشعة والبلورة (العينة). يبين الشكل (5-5) تقنية هذه الطريقة. أما زاوية براك (θ) لكل نقطة حيود فيمكن حسابها كآتي:

$$\tan (180 - 2\theta) = \frac{r_2}{D} \quad \dots\dots\dots(10-5)$$

حيث تمثل r_2 المسافة بين نقطة الحيود ومركز الفلم (نقطة مرور الشعاع الساقط). تكون العينة على هيئة بلورة منفردة أيضاً ولا يشترط ان تكون رقيقة.



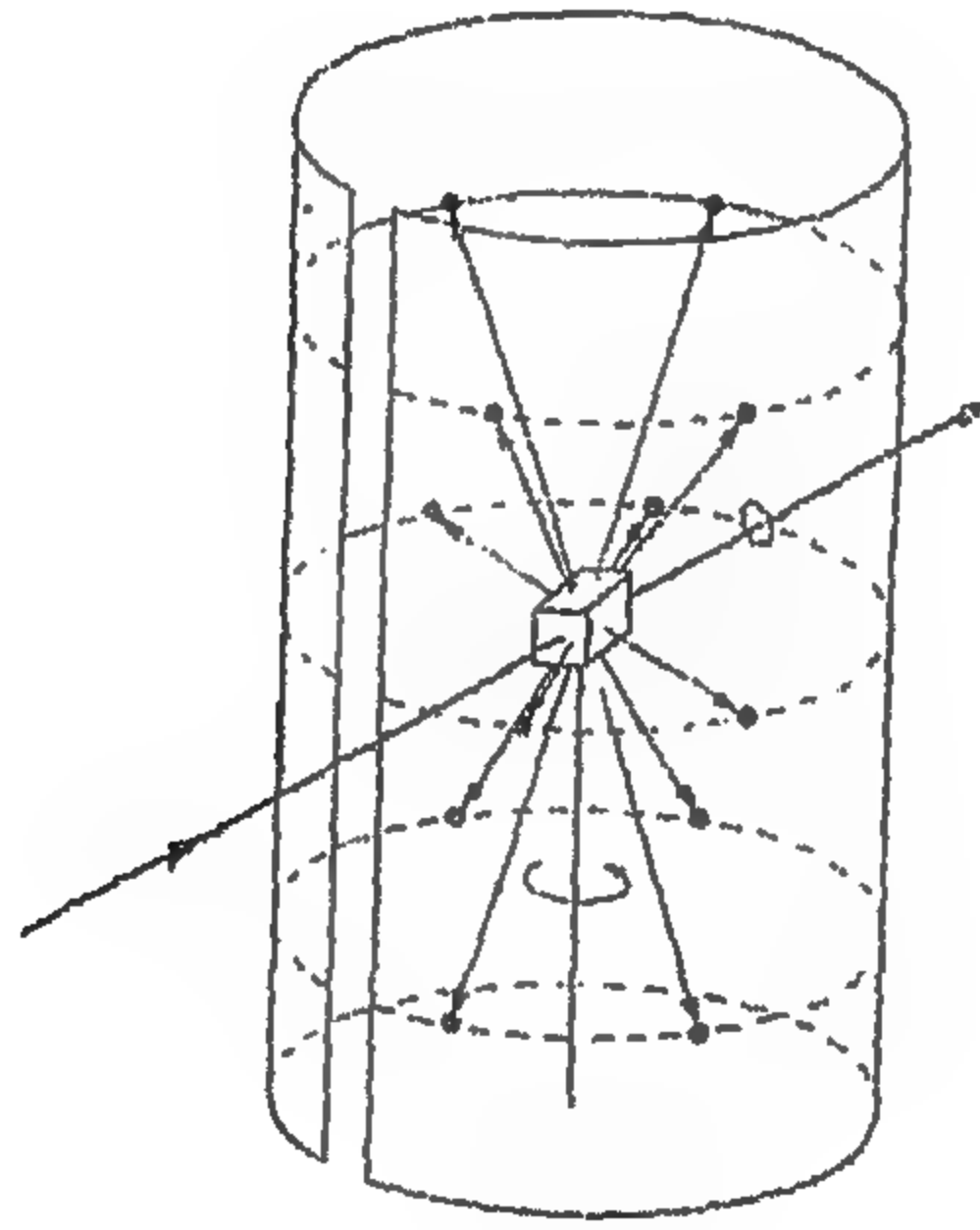
الشكل 5-5 رسم تخطيطي لكاميرا الاو بتقنية الانعكاس الخلفي.

يكون الفلم في كلتا الحالتين (أ و ب) على شكل لوح مستوي عمودياً على اتجاه الشعاع الساقط .

تستخدم طريقة لاوا بتقنياتها (أ و ب) أساساً لتعيين توجه (orientation) البلورة المنفردة وتخمين نوعيتها على سبيل المثال ، مدى تشويها و عيوبها :

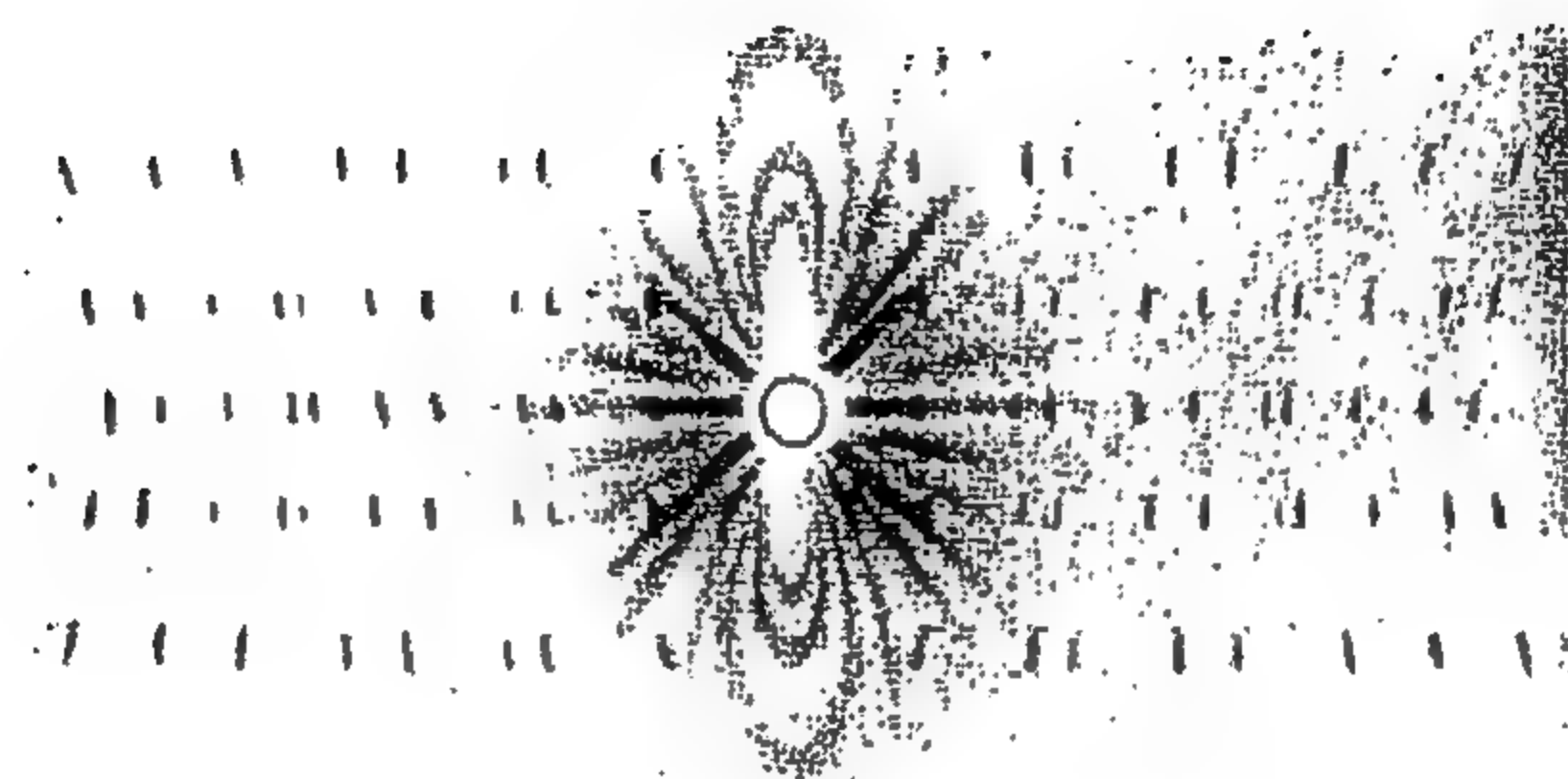
٢-٥-٥ طريقة تدوير البلورة Rotating crystal method

تستخدم في هذه الطريقة بلورة منفردة ويتم تثبيتها باتجاه أحد محاورها أو أي اتجاه بلوري مهم بحيث يكون عمودياً على اتجاه الأشعة السينية الاحادية الطول الموجي (monochromatic) الساقطة . يوضع فلم اسطواناني حول البلورة ثم تدور البلورة حول الاتجاه المختار بحيث يكون محور الفلم الاسطواناني متطابقاً مع محور تدوير البلورة كما مبين في الشكل (5-6) . فعندما تدور البلورة ستحقق بعض من مجاميع مستويات الشبكة البلورية، أنياً، قانون براك لذلك الشعاع الاحادي الموجه المستخدم وعند هذه اللحظة تتكون حزمة محادة.



الشكل 5-6 طريقة تدوير البلورة.

تشكل الحزم المحادة (المنعكسة) مخاريط وهمية بحيث تنطبق محاورها مع محور التدوير. يكون شكل نمط الحيود كما مبين في الشكل (5-7) ، وبما ان تدوير البلورة يتم حول محور واحد في هذه الطريقة لذلك لا يمكن ان تأخذ زاوية براك (θ) كل القيم الممكنة من صفر الى التسعين لكل مجموعة من المستويات.



الشكل 5-7 نمط الحيود بطريقة تدوير البلورة وبلورة الكوارتز (quartz) (سداسية) مدارها حول المحور (C). وباستخدام $\text{Cu K}\alpha$.

تستخدم هذه الطريقة أساساً لتعيين البنى البلورية اذا لم تكن معروفة.

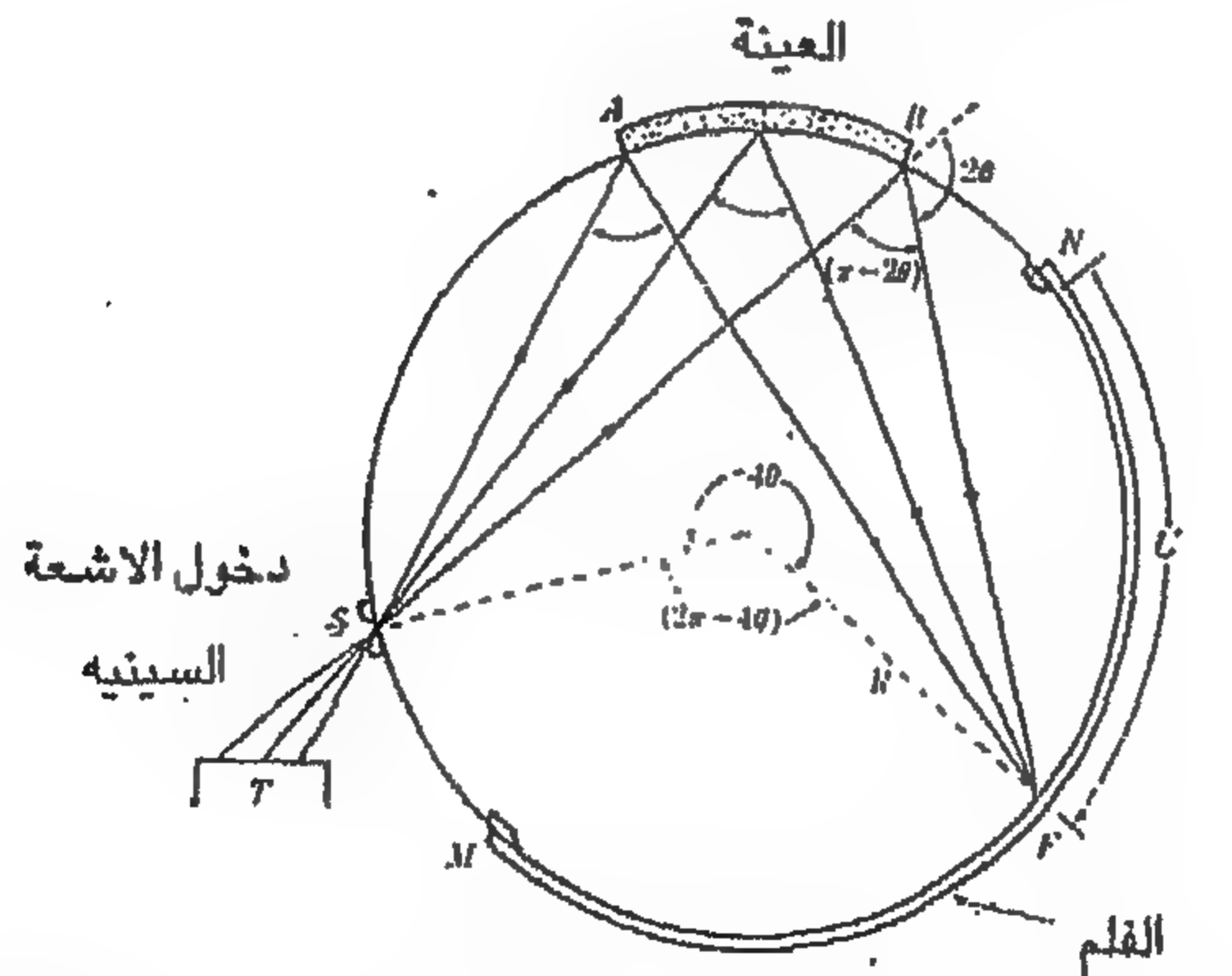
٣-٥-٥ طريقة المسحوق Powder method

تطحن البلورة المراد فحصها حتى تتحول الى مسحوق ناعم جداً او تكون العينة المفحوصة متعددة البلورات (polycrystalline) لأنها تكافئ المسحوق عملياً لهذا الغرض، ويتم وضعها في مسار الأشعة السينية الاحادية الموجه. فكل جسيم او

دقيقة في المسحوق يمثل بلوره او عدة بلورات صغيرة متجهة بشكل عشوائي نسبة الى اتجاه الشعاع الساقط. ولا بد ان يكون قسم منها، وبالصدفة، متجهاً اثنجهاً مضبوطاً، وذلك لكثرة عددها، بحيث ان المستويات (100)، على سبيل المثال، يمكن ان تعكس الشعاع الساقط. كما أن بقية البلورات ستكون متجهة بصورة مضبوطة للإنعكاس (110) وهكذا بالنسبة لبقية المستويات فتكون النتيجة ان كل مجموعة من مستويات الشبكة البلورية قابلة على الانعكاس. ولذا تكافئ كتلة المسحوق بالحقيقة بلورة منفردة تدور حول كل المحاور الممكنة وليس حول محور واحد.

ستكون الحزم المحادة هنا بهيئة مخاريط متعددة حيث يتكون مخروط منفصل لكل مجموعة من مستويات الشبكة البلورية تختلف بالمسافة البينية (d). هناك ثلاث طرائق رئيسية من طرائق حيود المسحوق اعتماداً على الموقع النسبي للعينة والفلم وشكلهما وهي:

١- طريقة الكاميرا المبتثرة Focusing Camera : وفيها يوضع الفلم والنموذج ومصدر الاشعة جميعها على سطح اسطوانته. يبين الشكل (5-8) احد أنواع هذه الكاميرات حيث يظهر في الشكل انعكاس واحد (hkl) كما يظهر موقع النموذج (AB) ومصدر الاشعة (S) والفلم MN.



الشكل (5-8) الكاميرا المبتثرة وقد ظهر انعكاس hkl واحد فقط.

يمكن استخراج زاوية براك (θ) من المسافة (U) المقاسة على الفلم اي من خط الحيود الى بداية الفلم عند النقطة (N) تقريباً ومن ثم استخدام العلاقة التالية:

$$4 \theta R = U + \text{القوس SABN} \quad \dots\dots\dots(11-5)$$

أما من الناحية التجريبية فتستخرج θ بضبط الكاميرا بوساطة مادة ذات ثابت شبكي (a) معلوم مثل NaCl بدلاً من تطبيق المعادلة (11-5) .

يمكن استخراج قدرة التمييز (resolving Power) لهذه الكاميرا بأخذ تفاضل المعادلة (11-5) حيث تكون:

$$d\theta = \frac{dU}{4R} \quad \dots\dots\dots(12-5)$$

وإذا قاضلنا معادلة براك ($\lambda = 2d \sin\theta$) نحصل على الآتي:

$$\frac{d\theta}{dd} = -\frac{1}{d} \tan \theta \quad \dots\dots\dots(13-5)$$

ومن اتحاد المعادلتين (12-5) و (13-5) ينتج أن :

$$\frac{dU}{dd} = -\frac{4R}{d} \tan\theta$$

اذن :

$$\text{قدرة التمييز (R.P)} = \frac{d}{\Delta d} = -\frac{4R}{\Delta U} \tan \theta \quad \dots\dots\dots(14-5)$$

وبهذه المعادلة (14-5) يمكن مقارنة قدرة التمييز (هي قابلية الجهاز لفصل خطوط الحيود من المستويات الذرية المتقاربة البعد البيني) لطرائق المسحوق الثلاث.

٢- طريقة ثقب الدبوس Pinhole method : يكون الفلم في هذه الحالة بهيئة لوح مستو موضوع عمودياً على حزمة الأشعة السينية الساقطة ويبعد عن النموذج بمسافة ملائمة. تشبه هذه التقنية تلك التي في طريقة لاوا وفيها حالتين أيضاً هما تقنيتا الحيود بالنفوذ و الحيود بالانعكاس الخلفي إلا أن الفرق الوحيد هنا هو أن النموذج إما أن يكون على هيئة مسحوق حقيقي أو يكون على هيئة قطعة متعددة البلورات ، والتي تكافئ المسحوق الحقيقي من الناحية العملية لهذه الفحوصات، كما

أسلفنا، لأن كل جسيم (أو دقيقة) من المسحوق يكافئ بلورة أو عدة بلورات من المادة المتعددة البلورات.

لهذه الطريقة ميزة على طرائق المسحوق الأخرى في ظهور حلقة حيود كاملة و ليس جزء منها كما في الطريقتين الآخرين. يبين الشكل (5-9) نمط حيود نافذ (Transmission diffraction Pattern) لصفحة من الألمنيوم. لكنه من الناحية الأخرى تكون قيم زاوية الحيود (θ) التي يمكن تسجيلها محدودة، فإما أن يتم الحصول على انعكاسات ذات زوايا منخفضة القيم أو مرتفعة القيم لكنه لا يمكن الحصول على مدى قيم الزوايا المتوسطة، لاحظ الشكل (5-10).

يمكن إيجاد (θ) بطريقة النفوذ من العلاقة التالية:

$$\tan 2\theta = \frac{U}{2D} \quad \dots\dots\dots (5-15)$$

حيث تمثل U قطر حلقة الحيود (حلقة دبي)

و D المسافة بين النموذج والفلم

أما حساب (θ) بطريقة الانعكاس الخلفي فتكون من العلاقة الآتية:

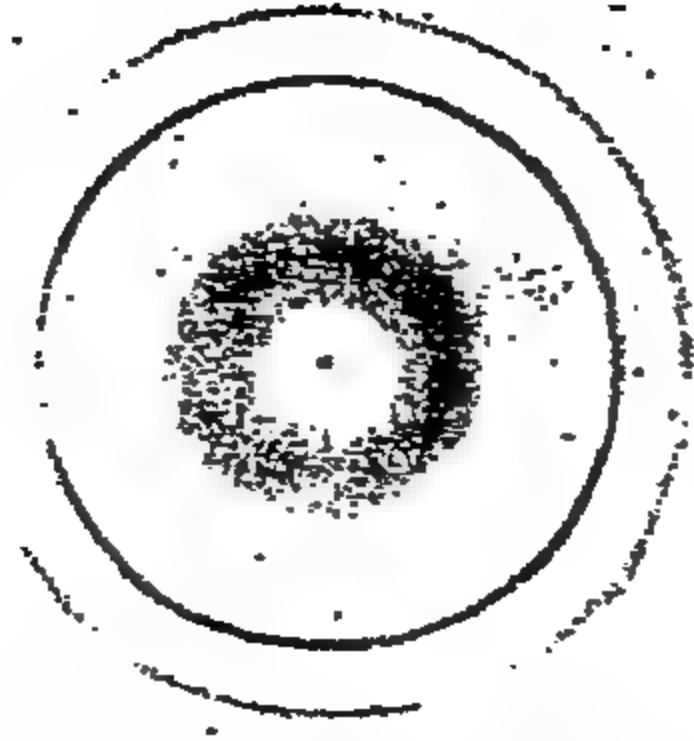
$$\tan (\pi - 2\theta) = \frac{V}{2D} \quad \dots\dots\dots (5-16)$$

حيث تمثل V قطر حلقة الحيود (حلقة دبي).

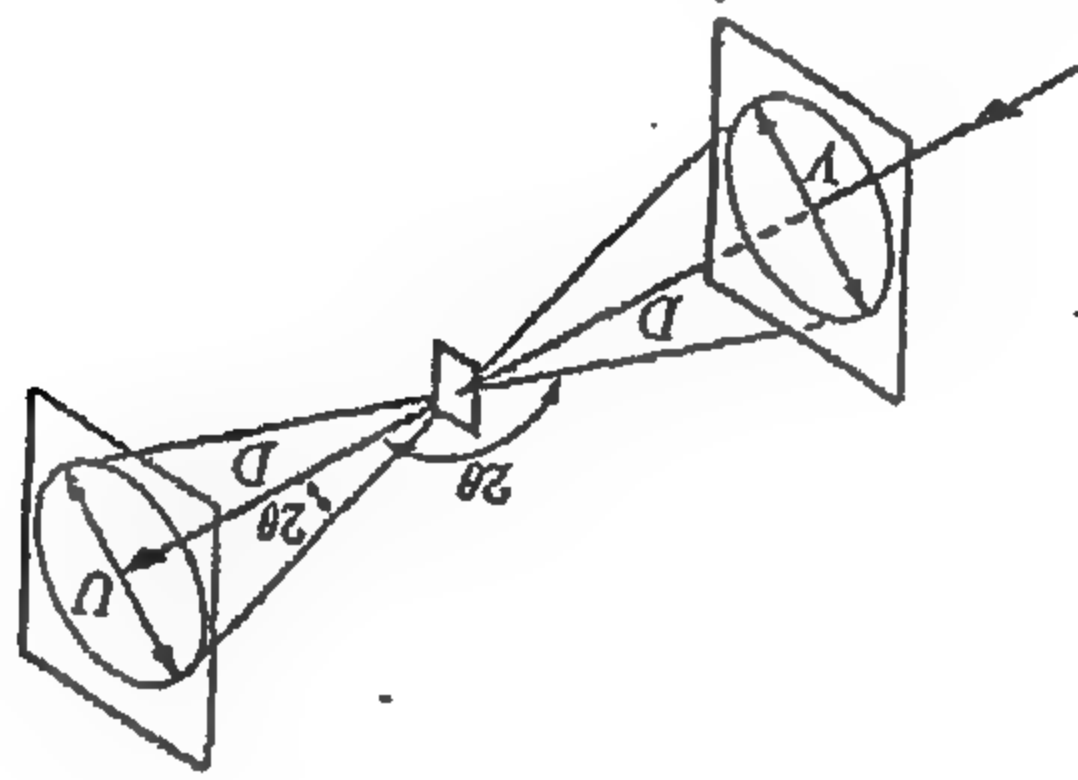
يكون مقدار المسافة D عادة بين 3 إلى 5 cm .

٣- طريقة دبي - شيرر Debye - Scherrer : وفي هذه الطريقة يوضع الفلم على سطح اسطوانه (الكاميرا) لاحظ الشكل (5-11) ، والنموذج في محور الاسطوانة ويكون اما على هيئة سلك متعدد البلورات او مسحوق موضوع في انبويه زجاجية او من اللدائن (البلاستيك) رقيقة الجدران وذات قطر صغير (بحدود 1mm أو أقل).

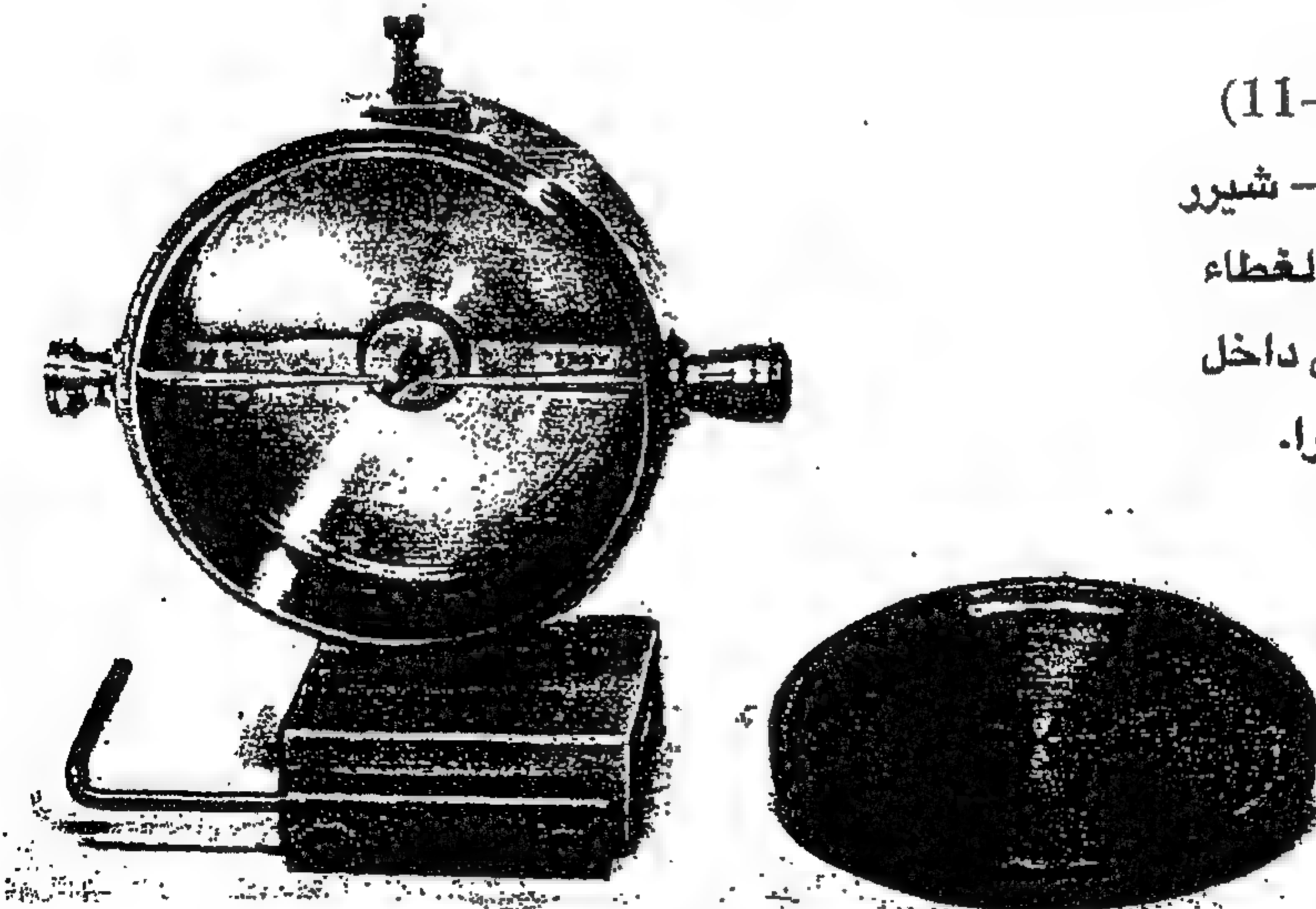
تكون الحزم المحادة في كل هذه الطرائق، وكما ذكر سابقاً، على شكل مخاريط محورها مطابق للشعاع الساقط او امتداده.



شكل (5-9) صورته لنمط حيود نافذ لصفيحة من الألمنيوم استخدمت الاشعة $CuK\alpha$
 ان عدم التجانس في عتمة حلقتي الحيود ناتج عن وجود توجه تفضيلي
 (Preferred orientation) في النموذج.



الشكل (5-10) العلاقات الزاوية في طريقة ثقب الدبوس.

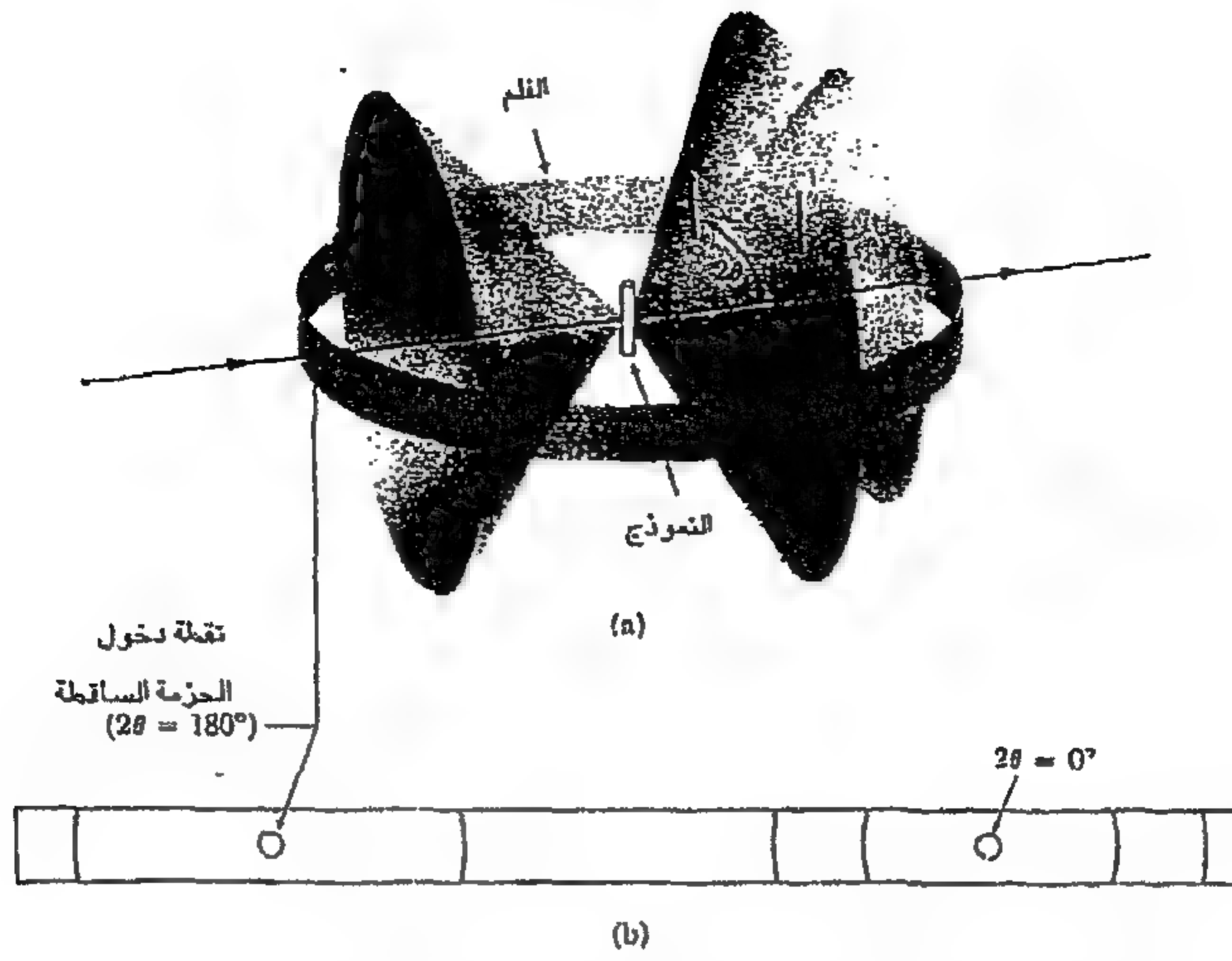


الشكل (5-11)
 كاميرا دبي - شيرر
 مع كشف الغطاء
 رؤية ما في داخل
 الكاميرا.

سيتم التركيز على طريقة دبي شيرر لشيوعها في مختبرات حيود الاشعة السينية التعليمية.

يبين الشكل (5-12) ثلاثة من هذه المخاريط . كما يوضح تقنية دبي - شيرر التي يتم فيها استخدام فلم على شكل شريط موضوع حول اسطوانة قصيرة ويكون النموذج في محورها والحزمة الساقطة موجهة عمودياً على هذا المحور. يكون تقاطع مخاريط الحيود مع شريط الفلم الاسطواناني بشكل خطوط وعندما يتم فتح الفلم ليكون بصورة مستوية يظهر نمط الحيود، بصورة تخطيطية، كما في الجزء الأسفل (b) من الشكل (5-12) يبين الشكل (5-13) صوراً لثلاثة انماط من الحيود لمساحيق معادن مختلفة البنية البلورية وهي النحاس (Cu) مكعب متمركز الوجه (FCC) والتنكستن (W) مكعب متمركز الجسم (BCC) والخرصين (Zn) سداسي متراص (HCP). يتكون كل خط حيود من عدد كبير من بقع (نقط) صغيرة كل واحدة تمثل دقيقة (جسيم) بلورية منفصلة. تتموضع هذه البقع قريبة جداً من بعضها بحيث تظهر كأنها خط متصل. تكون خطوط الحيود منحنية بصورة عامة ما لم تكون زاوية حيودها مساوية الى تسعين درجة ($2\theta = 90^\circ$) حيث ستكون مستقيمة. يمكن تعيين (θ) من قياس موضع خط الحيود على الفلم ومن معرفتنا للطول الموجي (λ) يمكن حساب المسافة البينية (d) لسطوح الانعكاس للمادة البلورية التي تكون ذلك الخط.

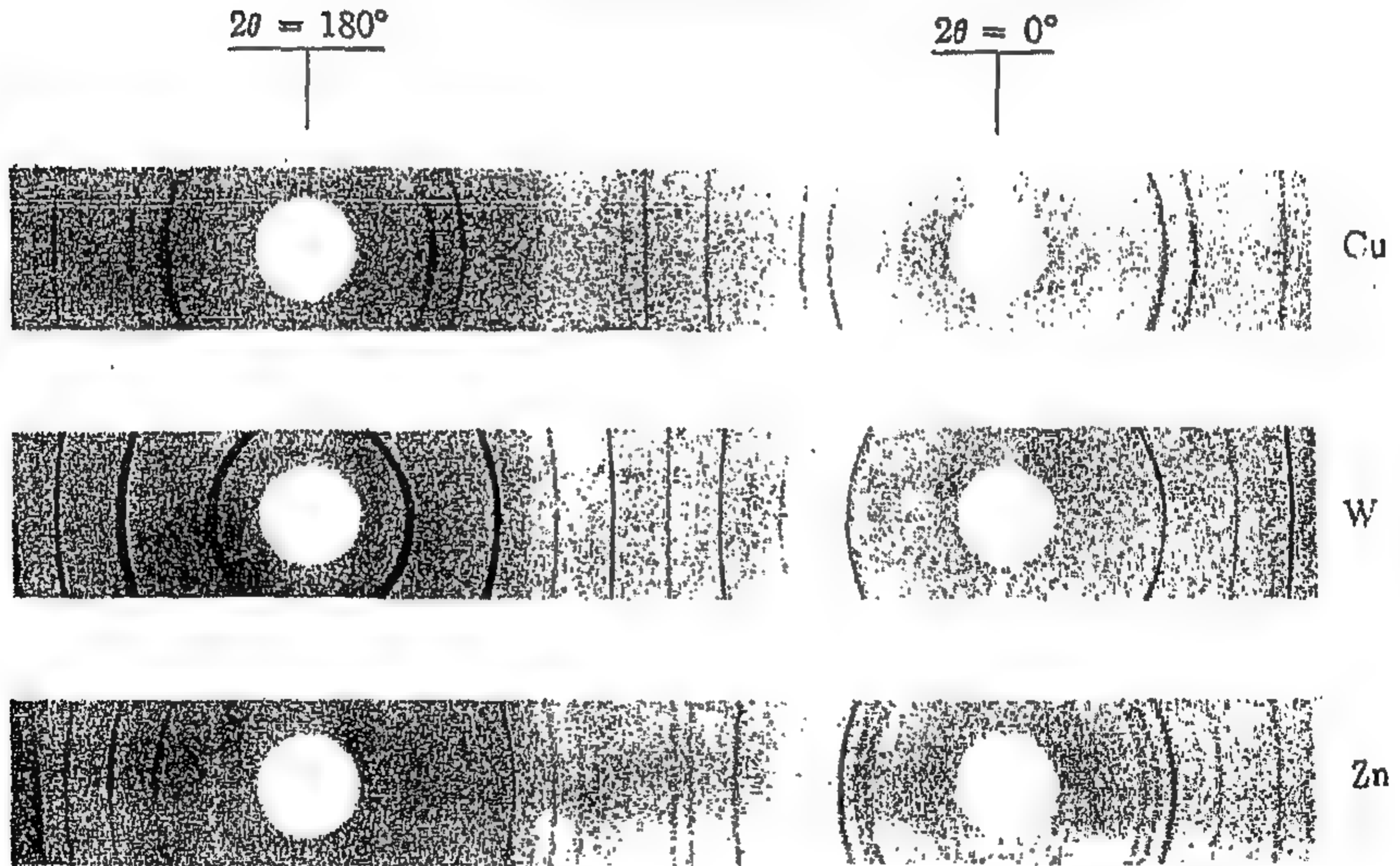
يمكن وبصورة عكسية، التنبأ بمواضع كل خطوط الحيود الممكنة على الفلم اذا علم حجم ونوع الخلية الاساسية للمادة البلورية. فيتولد الخط ذو قيمة 2θ الاوطء بالانعكاس من المستويات ذات المسافة البينية الاكبر فلو أخذ نظام المكعب، على سبيل المثال، تكون (d) اكبر ما يمكن عندما تكون ($h^2 + k^2 + l^2$) أصغر ما يمكن، وأقل قيمة لهذا الحد هو واحد، حيث تعود هذه القيمة للمستوى (100). ولذا يكون الانعكاس 100 له قيمة 2θ اقل من اي قيمة أخرى. أما الانعكاس الممكن الآخر الذي يلي هذا الانعكاس من حيث قيم 2θ فهو (110) وهو الانعكاس الذي يكون معاملته ($h^2 + k^2 + l^2$) مساوياً لاثنتين وهكذا.



الشكل (12-5) طريقة المسحوق لدبي - شيرر:

(a) علاقة الفلم بالنموذج والحزمة الساقطة

(b) مظهر تخطيطي بعد فتح الفلم على سطح مستوي.



الشكل (13-5) أنماط حيود بتقنية دبي - شيرر لمساحيق من النحاس (Cu)

(FCC) والتنكستن (W) (BCC) والخارصين (Zn) (HCP)

باستخدام $\text{Cu}\alpha$ بكاميرا ذات قطر مقداره 5.73 cm.

تستخدم طريقة دبي - شيرر بشكل واسع خصوصاً في حقل هندسة المعادن . وتعتبر طريقة المسحوق هي الطريقة الوحيدة الممكن استخدامها عندما لا تتوفر لدينا نماذج من بلورات منفردة (Single crystals) وهي الحالة الاعم والأغلب في حقل هندسة المعادن وأغلب المواد. تعتبر هذه الطريقة الأكثر ملاءمة لتعيين ثوابت الشبكة البلورية (Crystal Lattice Parameters) بدقة عالية وكذلك لتعيين الأطوار سواء كانت المادة ذات طور واحد فقط أو خليط من أطوار متعددة كما في السبائك المتعددة الأطوار (Polyphase alloys) ونواتج التآكل (Corrosion Products) والمواد المقاومة للحرارة (Refractories) والصخور (Rocks)، كما ان لهذه الطريقة استخدامات أخرى أيضاً في الحقول العلمية والصناعية الأخرى.

طرائق تحميل كاميرا دبي - شيرر بالفلم:

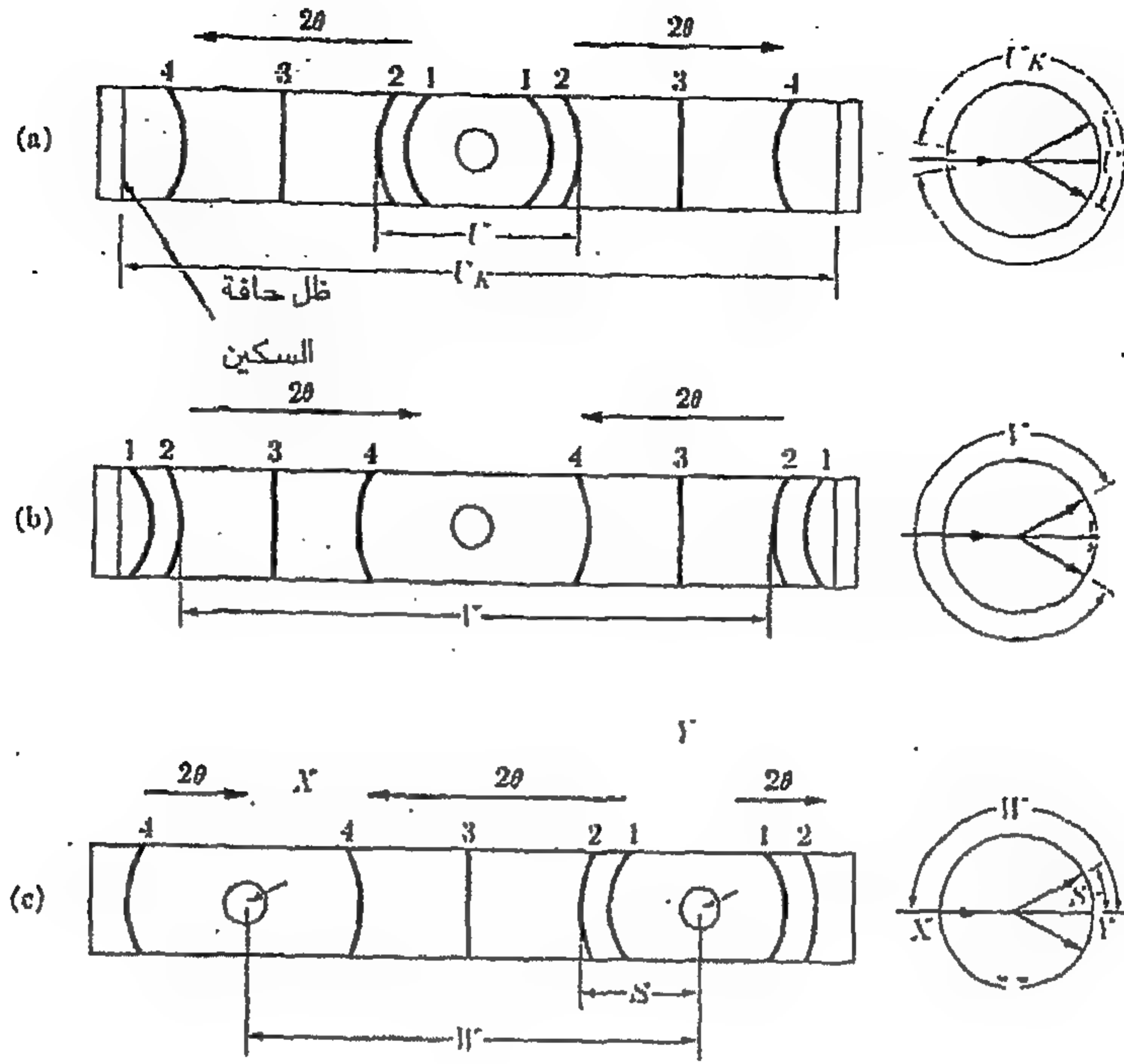
توجد ثلاث حالات تحميل يمكن تمييزها حسب مكان دخول الأشعة السينية وخروجها بالنسبة لنهايتي شريط الفلم.

يُثقب شريط الفلم ذو الطول المحدد، حسب قطر الكاميرا، إما ثقباً واحداً أو ثقبين وحسب الحالة المستخدمة في الكاميرا. يوضح الشكل (5-14) طرائق ترتيب شريط الفلم الثلاث. تبين الأشكال على جهة اليمين علاقة وضع الفلم مع اتجاه الشعاع الساقط بينما تمثل الأشكال على جهة اليسار اشربة الفلم مفتوحة بصوره مستويه.

يكون الثقب في الحالة (a) في مركز الفلم تماماً وفيها تدخل حزمة الأشعة من الفرجة الموجودة بين نهايتي الفلم ويكون خروج الحزمة النافذة من الثقب الموجود في مركز الفلم. يتولد من ذلك نمط حيود متناظر حول المركز. يتم الحصول على زاوية الحيود (θ) للإنعكاس المحدد بقياس (U) وهو يمثل المسافة الفاصلة بين خطي حيود متكونان من نفس مخروط الأشعة المحادة وكالاتي:

$$4 \theta R = U \quad \dots\dots\dots (5-17)$$

حيث تمثل R نصف قطر الكاميرا.



الشكل (5-14) طرائق تحميل الفيلم الثلاث في كاميرات دبي.

خطوط الحيود المتوافقة لها نفس الارقام في كل الأفلام.

الواقع ان فلم التصوير الضوئي وغيره ينكمش (يقصر) قليلاً أثناء عملية التحميض والتجفيف ، وهذا الانكماش بالنتيجة يؤثر على قياس المسافة (U) وفي النهاية على θ . لذا لزم تصحيح الخطأ الناتج عن الانكماش وذلك بملاحظة حافتي السكين التي يتم تثبيتها عند نهايتي الفيلم في الكاميرا لأنهما سيتركان أثراً حاداً واضحاً بعد اجراء الفحص وتحميض الفيلم . تنكمش المسافة القياسية بين الاثرين بنفس النسبة التي تنكمش بها المسافة بين اي زوج من خطوط الحيود العائدة لنفس

المخروط . لذا يمكن إجراء تصحيح للخطأ الحاصل من جراء الانكماش لأن المسافة الزاوية الفاصلة بين حافتي السكين في الكاميرا معلومة ($4\theta_k$) اما بالقياس المباشر او باستخدام مادة بلورية معلومة الثابت البلوري، وعليه يمكن الحصول على قيمة (θ) المضبوطة للإنعكاس المحدد من العلاقة التالية:

$$\frac{\theta}{\theta_k} = \frac{U}{U_k} \quad \dots\dots\dots (18-5)$$

U_k هي المسافة بين أثري حافة السكين على الفلم.

يوضح الشكل (b) حالة وضع الفلم التي تعاكس الوضع الأول (a). تمر الحزمة الساقطة من الثقب الموجود في الفلم وعليه تكون العلاقة .

$$(2\pi - 4\theta) R = V \quad \dots\dots\dots (19-5)$$

يمكن استخدام أثر حافتي السكين أيضاً في تصحيح انكماش الفلم.

توضح الحالة (c) من الشكل (5-14) عدم التناظر الموجود في نمط الحيود . يوجد في هذه الحالة ثقبين في الفلم حيث يمر الشعاع الساقط من أحدهما ويخرج الشعاع النافذ من الثاني. وبما أن من الممكن تعيين القياسات على الفلم عند مكان مرور الشعاع الساقط ومكان خروج الشعاع النافذ لذلك لا توجد ضرورة لاستخدام حافتي السكين لتصحيح انكماش الفلم. تكون الزاوية $2\theta = 180^\circ$ عند النقطة (X) وهي مركز مرور الشعاع (الحزمة) الساقط (منتصف المسافة بين الخطين 4 و 4) وبالتشابه تعتبر الزاوية $2\theta = 0^\circ$ عند نقطة Y حيث مكان خروج الشعاع النافذ من الكاميرا وتقع عند منتصف المسافة بين الخطين 1 و 1 . تعين قيمة 2θ كالآتي:

$$\frac{2\theta}{\pi} = \frac{S}{W} \quad \dots\dots\dots (20-5)$$

تمثل W المسافة بين النقطتين X و Y .

تمتاز طريقة التحميل غير المتناظر (الحالة c) بأنها لا تحتاج الى عملية تصحيح

بسبب انكماش الفلم ولا الى معرفة نصف قطر الكاميرا (R) . لذا صارت هذه الحالة (c) الاكثر شيوعاً في الاستخدام في مختبرات الحيود.

٦-٥ اختيار الطول الموجي للشعاع:

يجب على الباحث او المشتغل في مختبر الحيود اختيار الطول الموجي الملائم للمادة المدروسة في اية طريقة من طرائق المسحوق . فيجب مراعاة نقطتين عند الاختيار هما.

١- يجب ان يكون الطول الموجي للأشعة المميزة المستخدمة اقصر من الطول الموجي لحافة الامتصاص K (K-absorption edge) الخاص بالعينة وإلا فالأشعة المتألقة المتولدة ستضرب الفلم. أما في حالة السبائك او المركبات فقد يكون من الصعب او غير الممكن تحقيق هذا الشرط لكل العناصر الداخلة في تكوين العينة.

٢- يبين قانون براك انه كلما كان الطول الموجي المستخدم اقصر كلما كانت زاوية براك الخاصة بمستويات معينة أصغر. ولذا يؤدي تقليل الطول الموجي الى ازاحة كل خط من خطوط الحيود ليأخذ زاوية حيود أصغر ومن ثم يزيد من عدد الخطوط التي تظهر على الفلم، بينما تؤدي زيادة الطول الموجي الى العكس. ويعتمد اختيار طول موجي قصير او طويل نسبياً على طبيعة المادة المدروسة. يبين الجدول (1-5) عدد من الأطوال الموجية للأشعة السينية المميزة والتي تستخدم عادة في حقل حيود الاشعة السينية.

الجدول (1-5) عدد من الأطوال الموجية للأشعة المميزة المستخدمة عادة في مختبرات الحيود

نوع الأشعة المميزة	الطول الموجي (Å)
Mok α	0.711
Cu k α	1.542
Co k α	1.790
Fe k α	1.937
Cr k α	2.291

وبطبيعة الحال يجب استخدام المرشح الملائم لمنع مرور مركبة الطول الموجي $k\beta$ من الأشعة. ان أشعة $Cu k\alpha$ هي الأعم استخداماً من بقية الأطوال الموجية إلا أنها لا يمكن أن تستخدم في حالة المواد الحديدية، لأنها تسبب أشعة متألفة من الحديد الموجود في النموذج، لذلك يستعاض عنها في هذه الحالة بواحدة من الأشعة الآتية $Cr k\alpha$ أو $Fek\alpha$ أو $Cr k\alpha$.

٧-٥ المطياف والمحياد Spectrometer & Diffractometer

كان يطلق على كل جهاز يستخدم في حقل حيود الاشعة اسم المطياف. حيث تم استخدامه من قبل براك في دراسته الاولى لطيف الاشعة السينية والبنية البلورية. شاع بعد ذلك استخدام الكاميرات لتسجيل نمط الحيود على افلام التصوير. ثم انتجت في نهاية الاربعينات المطاييف بشكل تجاري وشاع استخدامها فيما بعد لما لها من ميزات على تقنية الافلام. فقد استعملت في البداية للبحوث ثم أصبحت أجهزة تستخدم للسيطرة والتحليل في العديد من المختبرات.

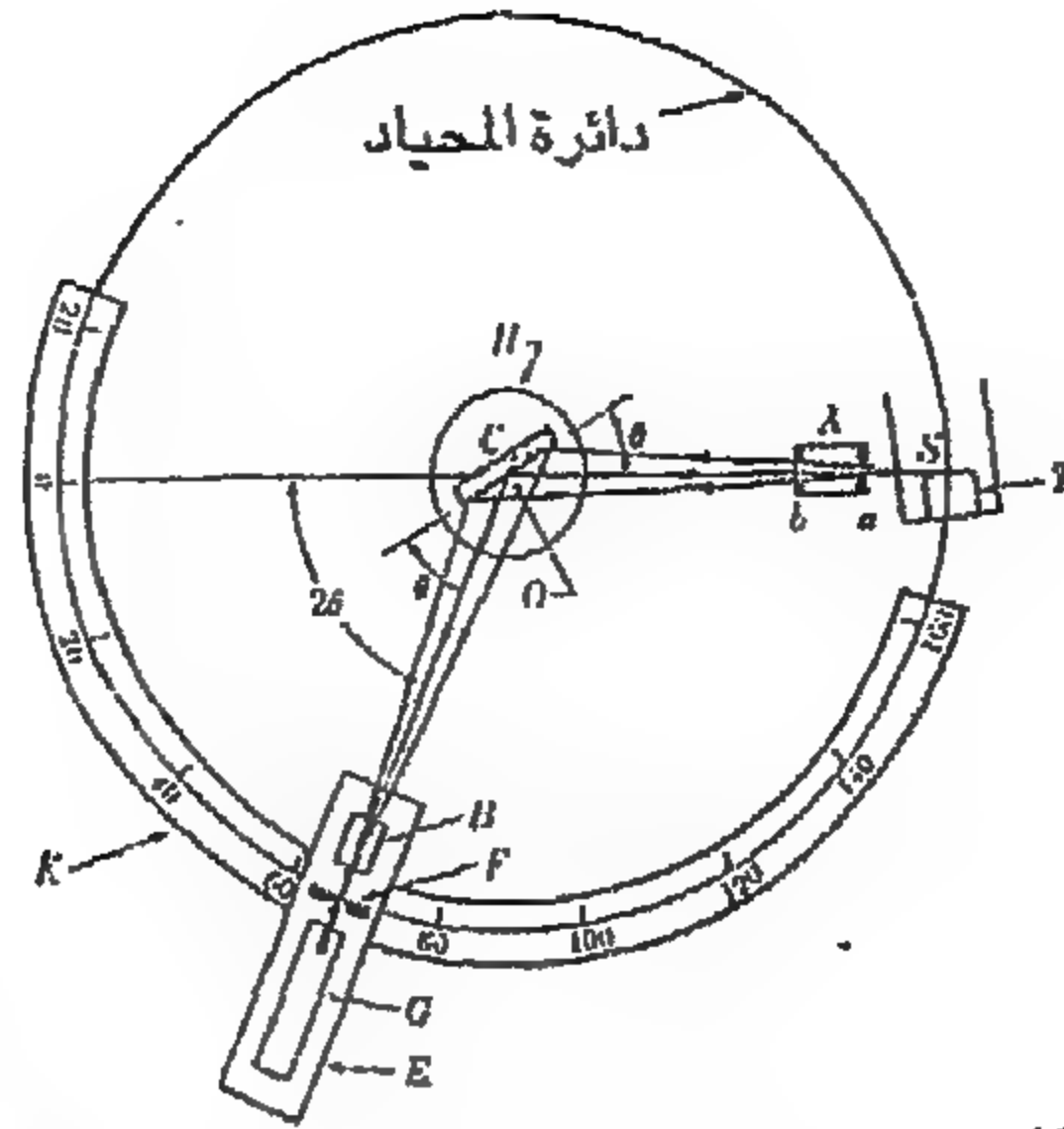
لقد تم تقسيم مطاييف الاشعة السينية الى نوعين من الاجهزة وحسب استخدامها :

١- الاجهزة الخاصة بقياس طيف الاشعة السينية (الطول الموجي) بوساطة بلورة معلومة البنية وسميت المطاييف (Spectrometers) .

٢- الاجهزة الخاصة بدراسة المواد البلورية وغير البلورية وذلك بدراسة الاسلوب الذي به تحيد الاشعة السينية ذات الطول الموجي المعلوم ، وسميت المحاييد (dif-fractometers) . لقد تم تحديد المحاييد وبموجب تسميتها لتحليل الحيود بدلاً من الطيف .

١-٧-٥ المحياد Diffractometer :

تم تصميم المحياد أساساً ليشابه كاميرة دبي- شيرر، عدا ان شريط الفلم قد استبدل بعداد متحرك . حيث تستخدم في كليهما أشعة احادية الطول الموجي وكاشف للأشعة السينية (سواء فلم او عداد) موضوع على محيط دائرة تسمى دائرة المحياد (diffractometer circle) وفي مركزها توضع عينه المسحوق . يبين الشكل (5-15) الاجزاء الأساسية للمحياد بصوره تخطيطية. تسند عينه المسحوق (C)، التي تكون مسطحة الشكل، على الطبلة (H) التي يمكن تدويرها حول المحور (O) العمود على ورقة الكتاب. (S) يمثل مصدر الأشعة السينية، حيث تسقط الاشعة السينية على العينة من خلال الفتحة القابلة للتغيير (A) ثم تحاد الاشعة عند العينة لتتجمع عند النقطة (F) مارة بالفتحة (B) ومن ثم تدخل إلى عداد الاشعة (G). يوضع المرشح عادة في طريق الاشعة المحادة ، وهو غير مبين في الشكل، حيث يستفاد من المرشح في هذه الحالة ليس فقط في منع $K\beta$ من المرور وانما لتقليل أشعة الخلفية (Background radiation) و، المتولدة أساساً من العينة.

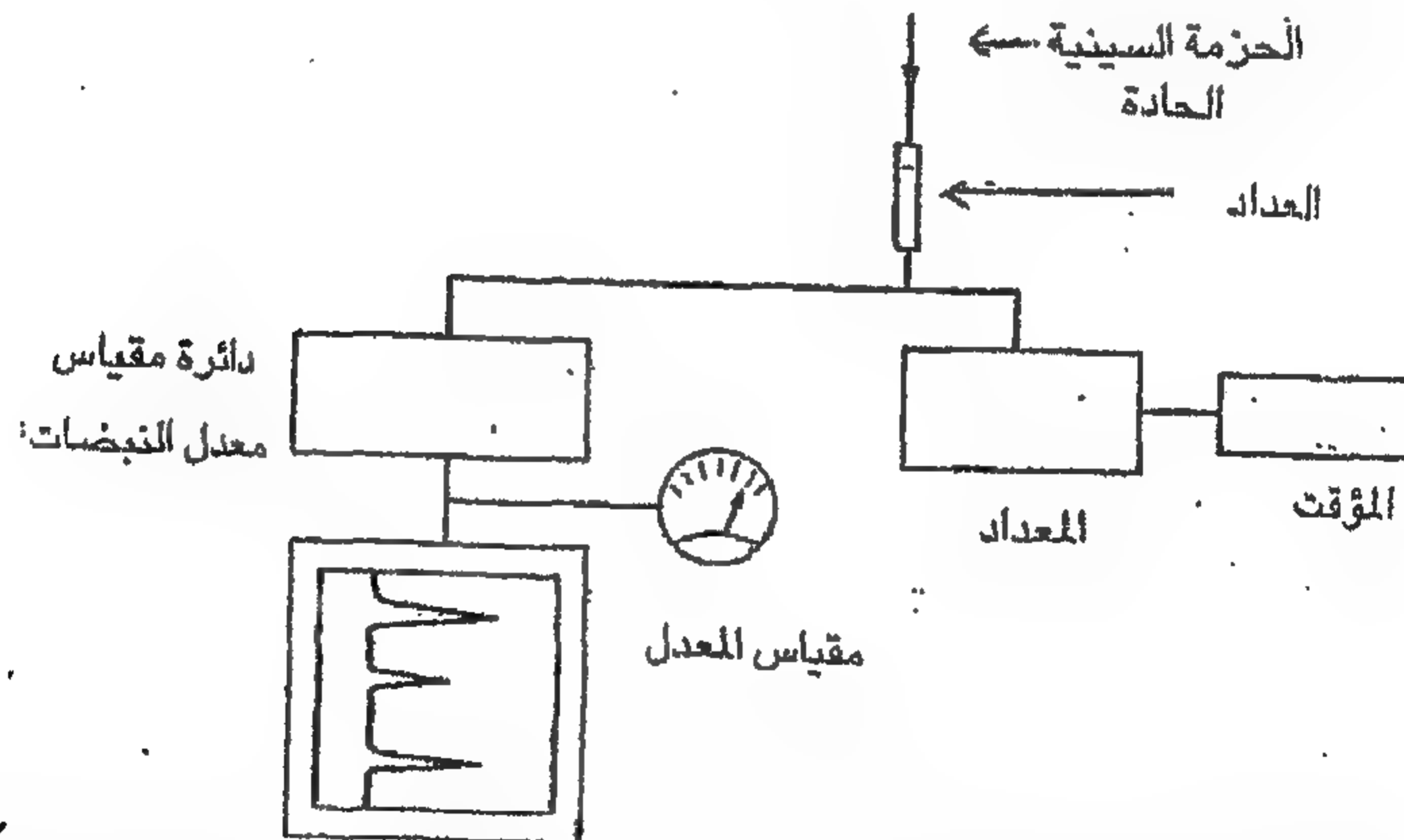


الشكل (5-15) محياد الاشعة السينية بصورة تخطيطية.

يدور العداد حول محور المحياد O حيث تتم قراءة موضعه (20) على المدرج (K). صمم الجهاز بحيث اذا دارت العينة زاوية مقدارها (X) يدور العداد بزاوية مقدارها (2X) وهو الشرط اللازم للحفاظ على تبثير (تجمع) الاشعة المحادة على فوهة العداد على الدوام عند التدوير.

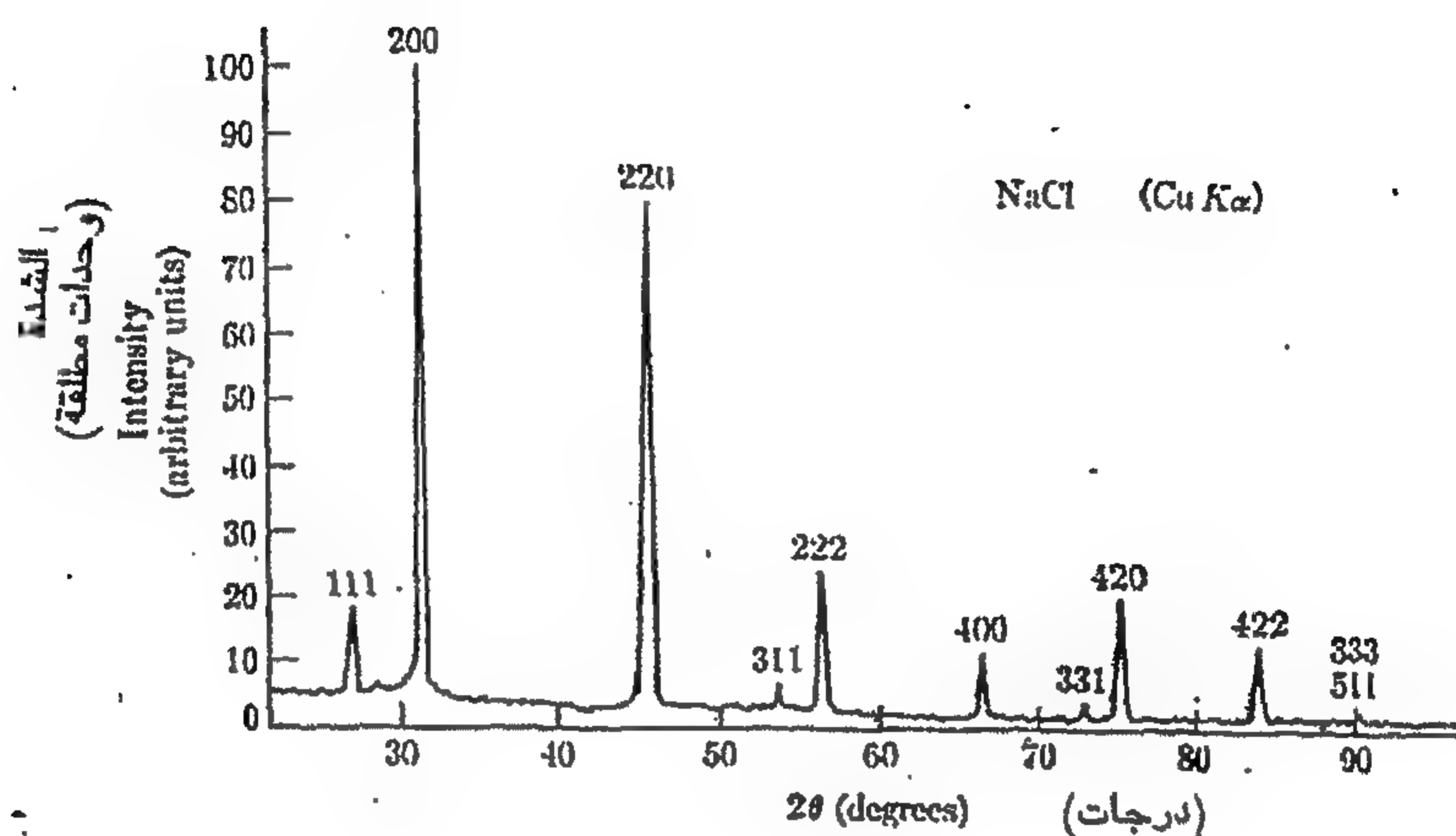
تمر النبضات الكهربائية الخارجة من العداد الى دائرة الكترونية ثم الى جهاز تسجيل ورقي (recorder) لرسم نمط الحيود على شكل نبضات او قمم، او بالتبادل الى جهاز راسم متصل بالحاسوب .

يبين الشكل (5-16) مخطط لدوائر الكاشف الخاص بالمحياد.



الشكل (5-16) مخطط لدوائر الكاشف الكهربائي الخاص بالمحياد. وتبدو دائرة معدل العد الرقمي والراسم البياني، كما ان المعداد والمؤقت يعملان سوياً.

يمكن عندئذٍ تحليل نمط الحيود بعد تأشير مقدار زاوية البدء على ورقة المسجل وتعيين سرعة الورقة وما يقابلها من درجات لحساب مقدار زاوية كل نبضة . يوضح الشكل (5-17) نمط حيود مسحوق ملح الطعام (NaCl) وعند استخدام الأشعة السينية $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.54 \text{ \AA}$) حيث كان المرشح المستخدم هو النيكل (Ni) .



الشكل (5-17) نمط حيود مسجل اوتوماتيكياً لمسحوق من NaCl استخدمت أشعة النحاس مع مرشح من النيكل . يظهر هنا حوالي نصف المدى الممكن للزوايا 2θ . الأعداد على محور الشدة هي أعداد نسبية.

٢-٧-٥ المطياف Spectrometer

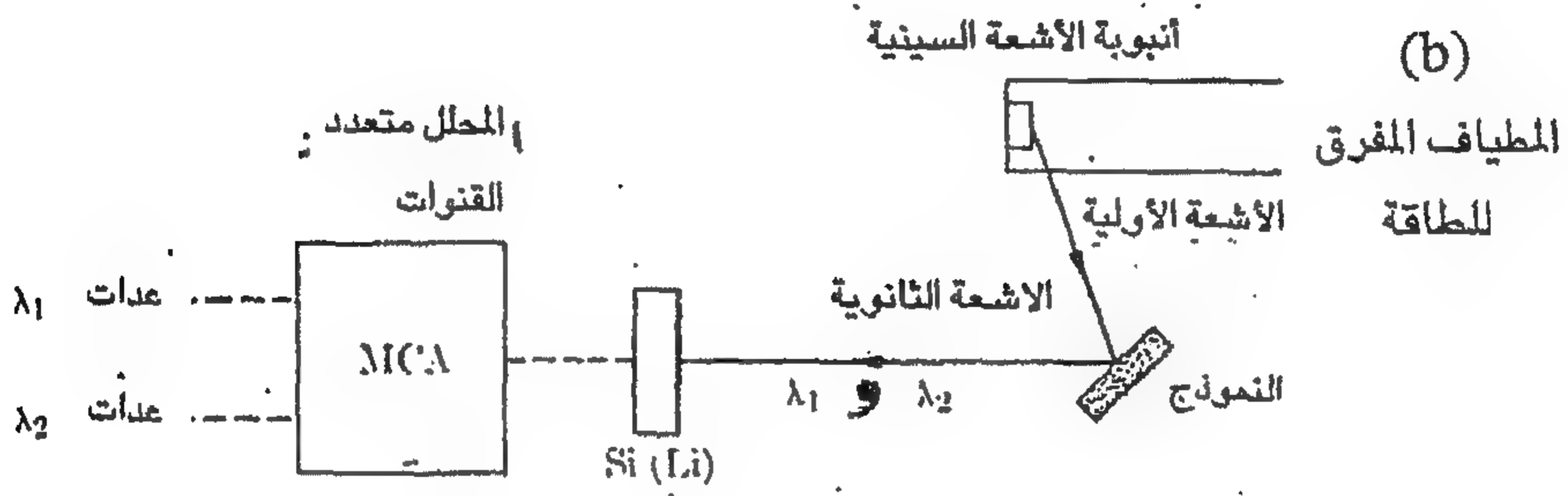
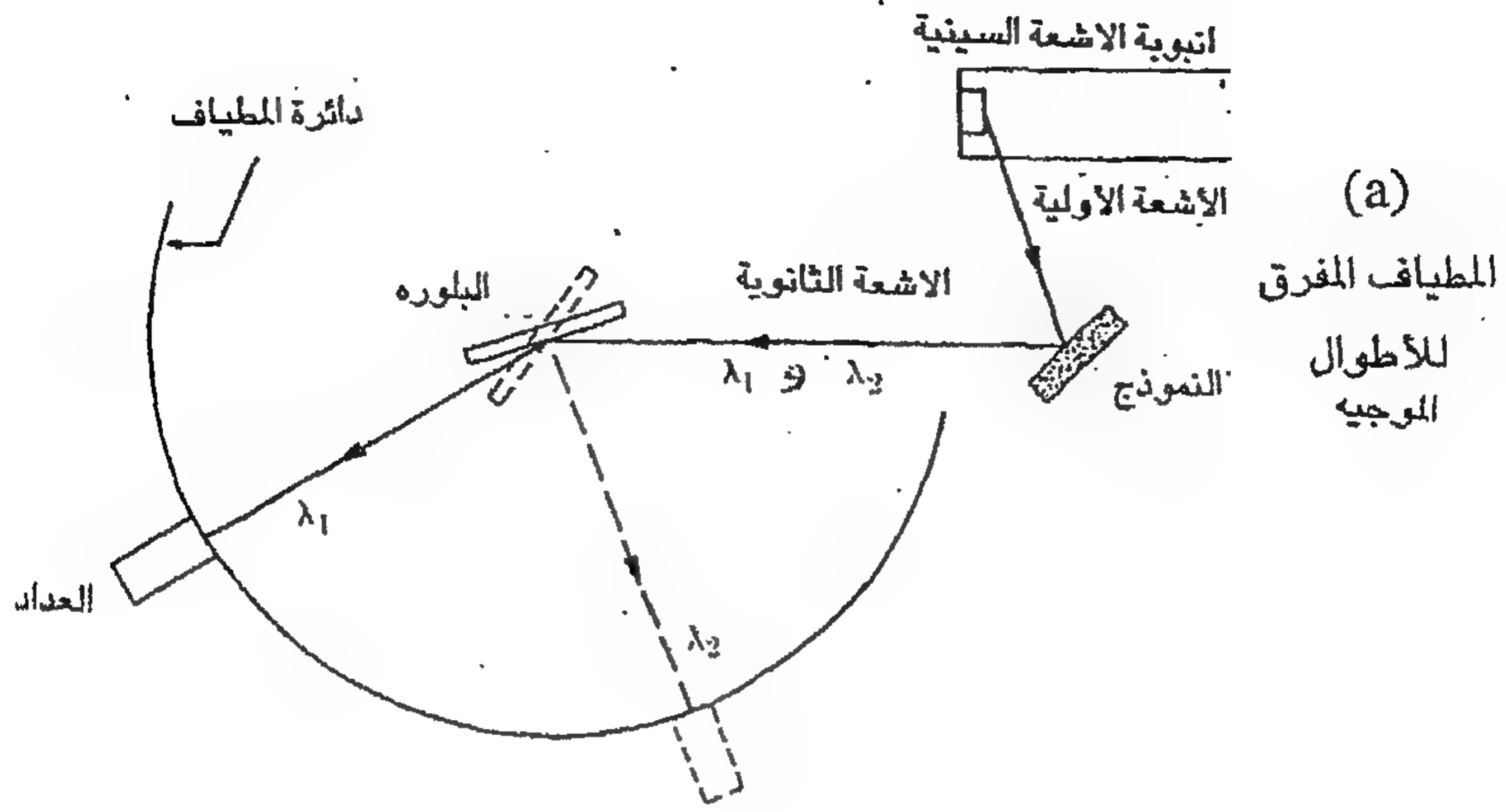
تنبعث خطوط الأشعة المميزة من العنصر إذا سقطت عليه أشعة سينية عالية الطاقة . وقد سميت هذه الظاهرة بالتألق (fluorescence) ولذا تسمى الأشعة السينية المنبعثة بالأشعة المتألقة وأحياناً بالأشعة الثانوية (Secondary X- rays) تمييزاً لها عن الأشعة الأولية الساقطة .

تعتبر هذه الظاهرة هي الأساس في طريقة التحليل الكيماوي بمطياف الاشعة السينية. فيتم الكشف عن كل عنصر بتحليل الاشعة المنبعثة وملاحظة وجود الاطوال الموجية الخاصة به. يتم التحليل بمطياف الاشعة السينية بتقنيتين وحسب نوع الجهاز المستخدم:

١- المطياف المفرق للأطوال الموجية Wavelength Dispersive Spectrometer :

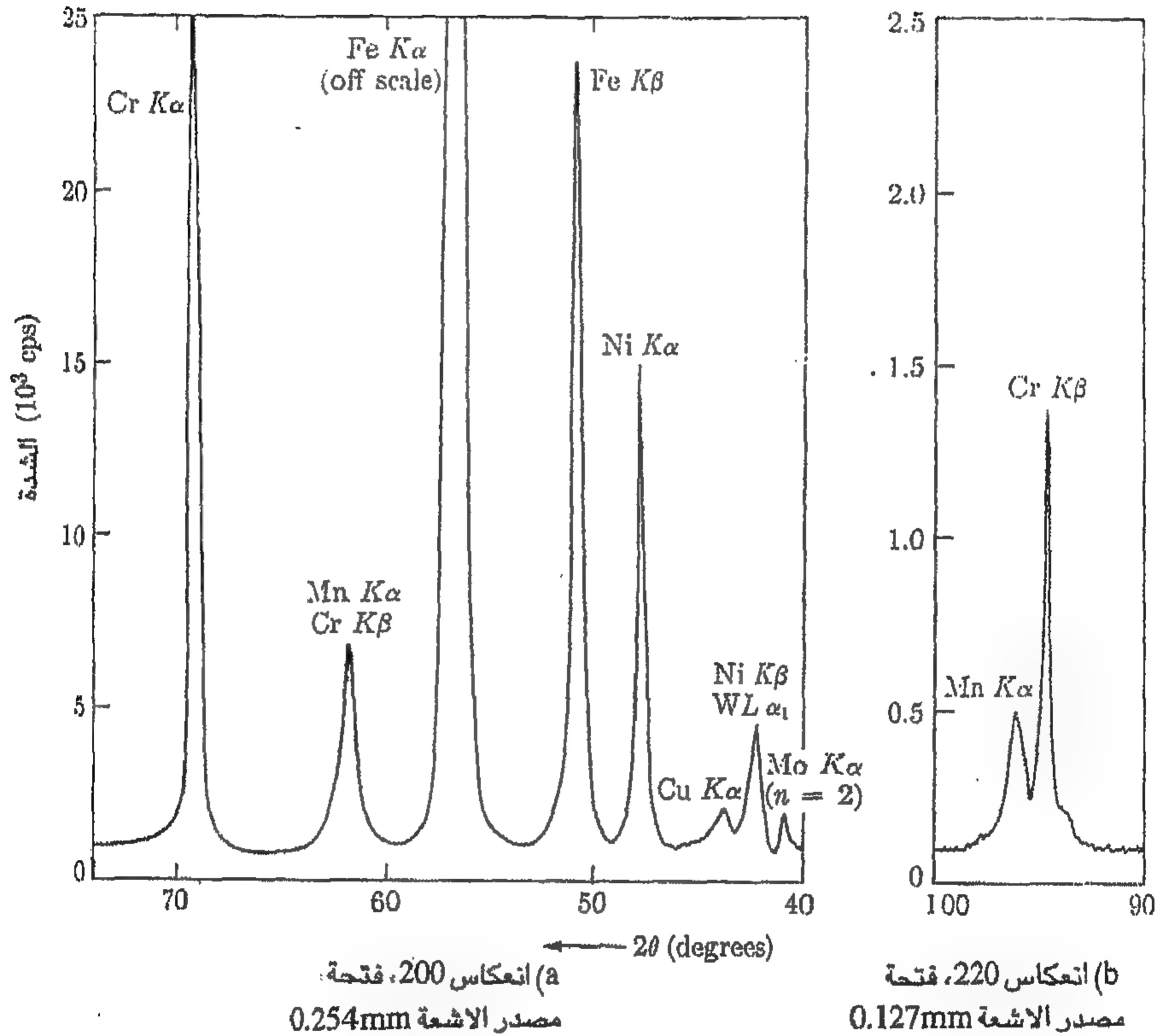
ويرمز له اختصاراً بالحروف (WDS). وفيه يتم حيود الاشعة المنبعثة من العينة بمستويات شبكية بلورة منفردة (Single crystal) معلومة التوجه (Orientation) والبنية اي معلومة المسافات البينية (d). فينعكس كل شعاع ذو طول موجي واحد عند كل وضع زاوي للبلورة وحسب قانون براك. يمكن قياس شدة الاشعة هذه باستخدام كاشف (detector) او عداد ملائم كما في الشكل التخطيطي (5-18) (a). وحيث ان الاطوال الموجية المختلفة تفرق او تحاد باتجاهات مختلفة في الفضاء لذا سميت هذه الطريقة بطريقة التفريق. يدعى هذا النوع من المطاييف في بعض الاحيان بمطياف البلورة (Crystal spectrometer).

وبالاعتماد على قانون براك تتم معرفة الاطوال الموجية المميزة للعناصر الداخلة في التكوين الكيماوي للعينة. وبما ان (d) ثابتة في هذه الحالة و (θ) يتم قياسها عملياً فيمكن اذن حساب الاطوال الموجية وعندئذ تقارن بالأطوال الموجية للعناصر المتوقع وجودها فإن تطابقت النتائج دل ذلك على وجود تلك العناصر في العينة. أما المقدار او النسبة المئوية لمقادير العناصر الموجودة فتحسب من ارتفاع قمم النبضات في ورقة الراسم البياني بعد عمل معايرة للعناصر الموجودة باستخدام نماذج قياسية (معلومة التكوين الكيماوي بالضبط).



الشكل (5-18) مطيافاً للأشعة السينية المتألقة . في هذا المثال يبعث النموذج طولين موجيين مميزين λ_1 و λ_2 يقاس الطولان الموجيان هذان بواسطة حيود البلورة في (a) او بواسطة تحليل ارتفاع النبضة (الطاقة) في (b) ، MCA = multichannel analyzer .

يبين الشكل (5-19) طيف فولاذ مقاوم للصدأ مثار بأشعة سينية اوليه من انبوبة ذات هدف من البلاتين. تظهر في الشكل خطوط K لكل المكونات الاساسية Fe و Cr و Ni وبعض المكونات الثانوية Mo و Mn. يوجد أيضاً أحد خطوط L لعنصر التنكستن (W).

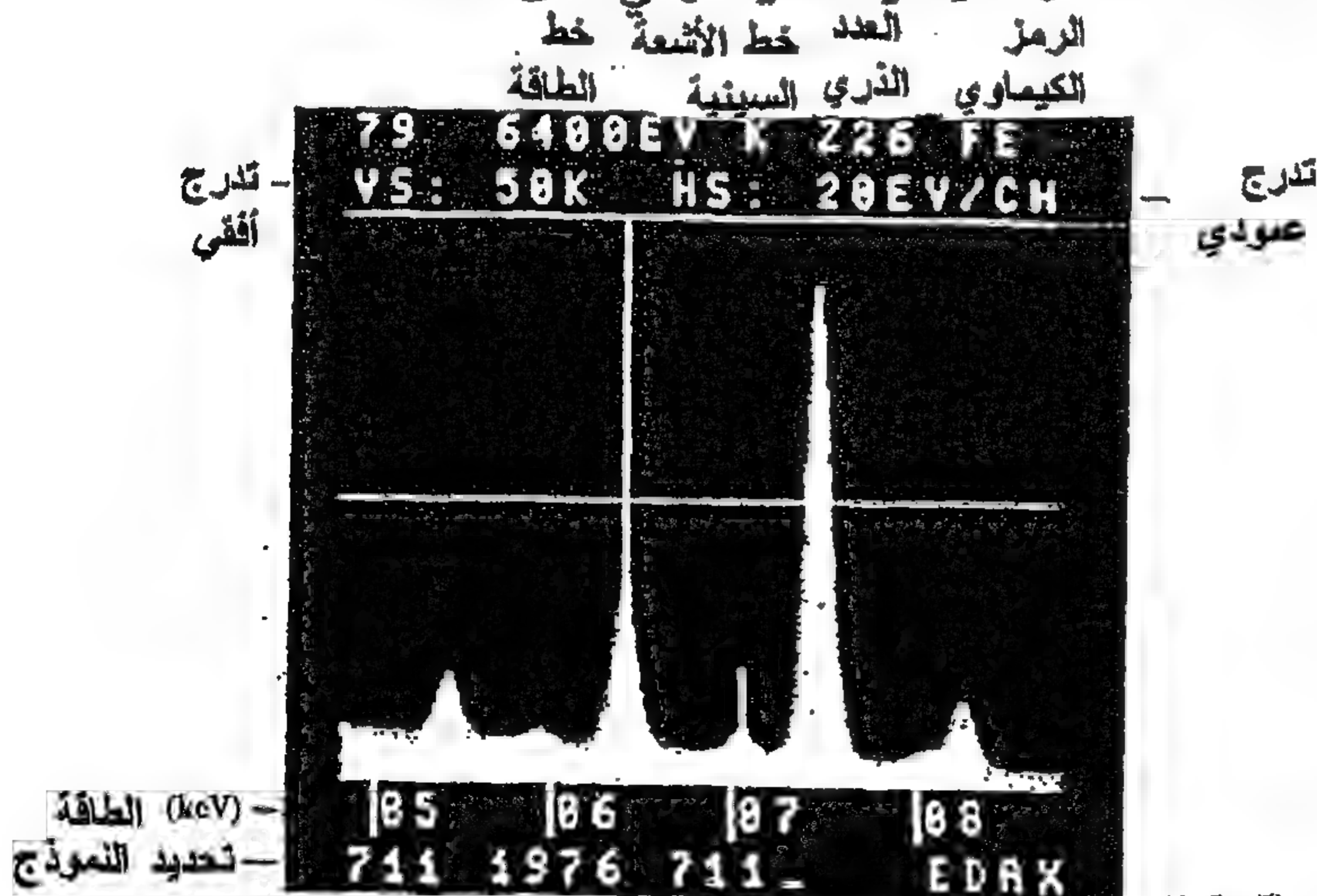


الشكل (5-19) طيف التآلق المسجل للفولاذ المقاوم للصدأ و المحتوي على Cr 19.4 و Ni 9.5 و Mo 1.5 و W 1.4 و Mn 1.0 المقادير هي وزناً بالمئة اما المتبقي فهو الحديد (Fe). استخدمت في هذا التحليل بلوره منفردة مسطحة من LiF. كان معدن الهدف في انبوبة الاشعة هو Pt عند 40m A و 50 kV.

كانت انبوبة الأشعة ، لهذا الشكل ، مشغلة عند 50kV و 40mA . وقد كانت البلورة المنفردة المستخدمة في الجهاز هي LiF وباتجاه الانعكاس 200 . أما مقادير العناصر الداخلة في التكوين الكيماوي للعينه فقد كانت كالآتي (وزناً بالمئة) 19.5 Ni و 19.4 Cr , و 5.5 Mo و 1.4 W و 1.0Mn , اما العنصر المتبقي فهو الحديد (Fe).

٢- المطاييف المفرق للطاقة: Energy Dispersive Spectrometer (EDS)

لاتدخل عملية الحيود في هذا النوع من المطاييف. فيتم فصل مختلف الأطوال الموجية للأشعة المنبعثة من العينة على أساس طاقاتها بوساطة عداد Si (Li) ومحلل القنوات المتعددة (MCA) Multichannal analyzer. يولد العداد نبضات تتناسب في ارتفاعها مع طاقات الشعاع الساقط عليه، ومن ثم يفرق محلل القنوات المتعددة مختلف ارتفاعات النبضات كما في الشكل (8-18) b . وحيث ان هذه العملية لا تتضمن تفريق فيزيائي في المجال للأطوال الموجية (الطاقات) تسمى مثل هذه المطاييف، في بعض الاحيان ، المطاييف غير المفرقة (nondispersive). يعتبر هذا النوع من المطاييف احدث من النوع الأول. يبين الشكل (5-20) نموذجاً لتسجيل نبضات مختلفة الطاقات صادرة من عينة معينة وفي مدى محدد.



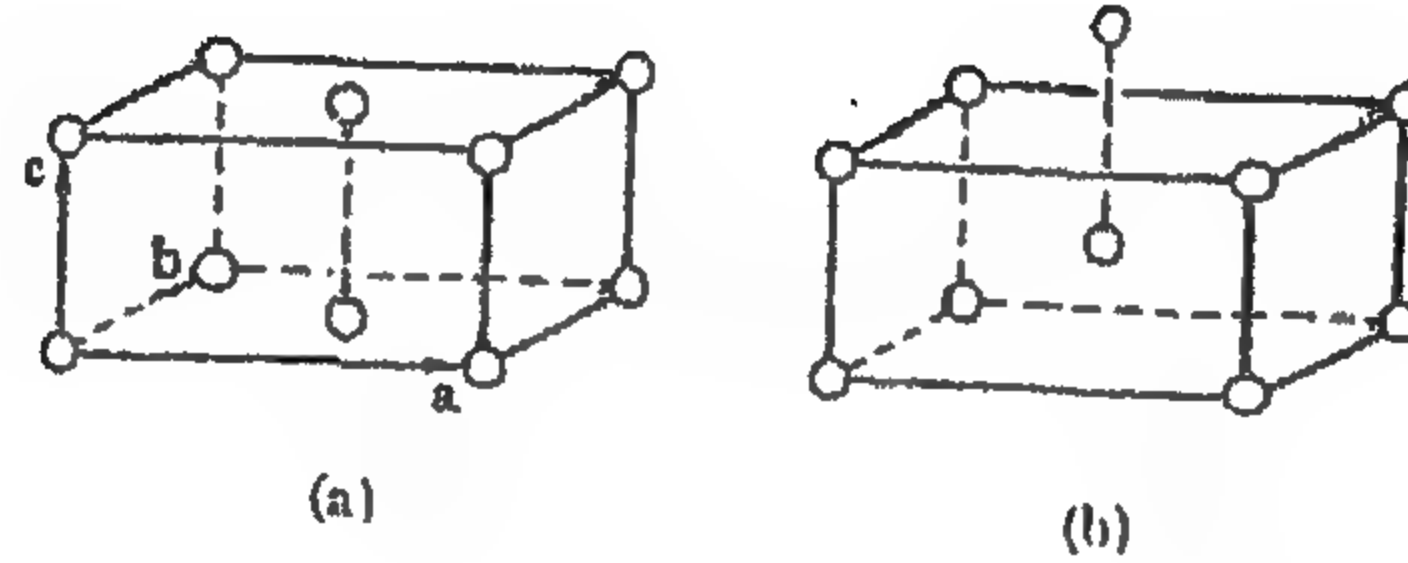
الشكل (5-20) عرض صورة النبضات في المطاييف المفرق للطاقة.

٨-٥ مستويات الانعكاس الممكنة ومعامل البنية الذرية "F":

Possible Reflecting Planes and Atomic Structure Factor

٨-٥-١ المقدمة:

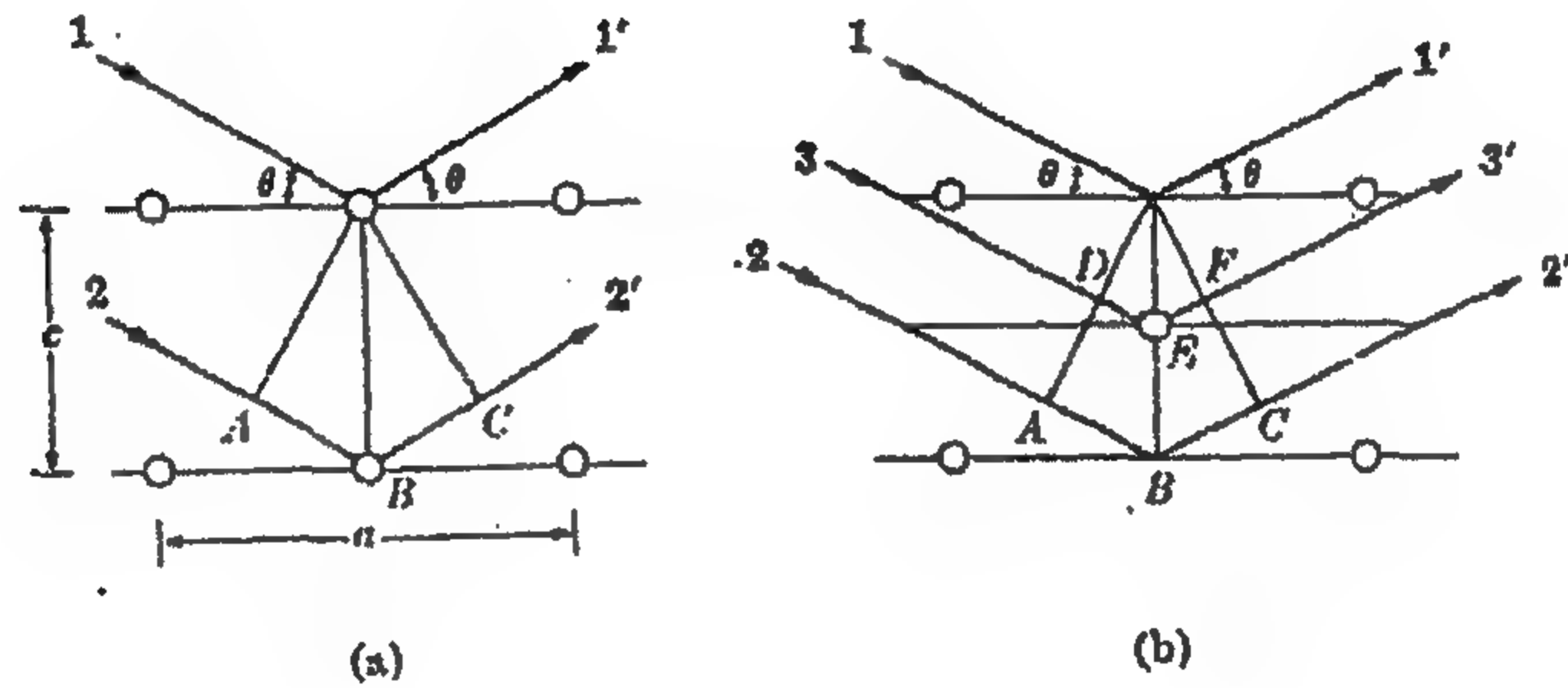
ذكرنا سابقاً أن مواضع الذرات في الخلية الأساسية تؤثر على شدة الحزم المحادة وليس على اتجاهها. يمكن ملاحظة ذلك عند دراسة البنيتين البلوريتين المبينتين في الشكل (21-5). فكلا البنيتين متعامدة الاضلاع (orthorhombic) وتحتوي على ذرتين من نفس النوع في الخلية الأساسية، إلا أن إحداهما (على اليسار) متمركزة القاعدة والثانية (على اليمين) متمركزة الجسم. ويمكن تحويل كل منهما إلى الأخرى بإزاحة بسيطة بمقدار المتجه $c \frac{1}{2}$.



الشكل (21-5) متعامد الاضلاع متمركز القاعدة في (a) ومثله متمركز الجسم في (b).

فلو تم فرض أن الانعكاسات تحدث من المستويات (001) المبين مقطوعها في الشكل (22-5) وأن قانون براك يتحقق عند القيم المحددة من λ و θ في الحالة (a) للشبيكة البلورية المتمركزة القاعدة. يعني هذا أن فرق المسار ABC بين الشعاعين $1'$

و $2'$ مساوياً لطول موجي واحد، لذلك يكون الشعاعان $1'$ و $2'$ في حالة توافق طوري ولذا يحدث حيود في الاتجاه المبين. وبالتشابه يكون الشعاعان $1'$ و $2'$ في توافق طوري في الحالة (b) (للشبيكة البلورية المتمركز الجسم) لأن فرق المسار ABC مساوٍ لطول موجي واحد أيضاً لكنه في هذه الحالة هناك مستوي بلوري آخر في منتصف المسافة بين المستويات (001)، و فرق المسار DEF بين الشعاعين $1'$ و $3'$ هو بالضبط نصف ABC أو ما يساوي لنصف الطول الموجي . لذا يكون الشعاعان $1'$ و $3'$ في حالة فرق طوري تام ومن ثم يمحو كل منهما الآخر ويتلاشان. وبالتشابه يمحو الشعاع $2'$ تأثير الشعاع $4'$ (غير مبين في الشكل) المنعكس من المستوى السفلي. وهكذا الحال خلال تمام البلورة. يستنتج من هذا أن أنه لا يوجد انعكاس من المستويات (001) في حالة البنية المتمركزة الجسم.



الشكل (22-5) حيود من المستويات (001) للخلية المتمركزة القاعدة في (a) و لخلية متمركزة الجسم في (b) وكلتاهما من شبكية متعامدة المحاور.

يبين هذا المثال ان التغيير البسيط في ترتيب الذرات داخل الخلية الأساسية يمكن ان يزيل الانعكاس تماماً. وبصوره عامة تتغير شدة الشعاع المحاد مع اي تغيير في مواضع الذرات وليس بالضرورة ان تكون صفراً. وبالعكس يمكن تعيين مواضع الذرات بملاحظة الشدات المحادة. ولأجل وضع علاقة رياضية بين موضع الذرة والشدة المحادة يلزمنا دراسة كيفية استطارة الاشعة السينية بالإلكترون ثم بالذرة وأخيراً بالخلية الأساسية. لأن الخلية الأساسية تتألف من ذرات والذرة فيها الكترونات لذا فالعملية معقدة لكنه سنحاول التبسيط قدر المستطاع للوصول الى النتيجة النهائية. أضف الى ذلك فهناك عوامل آخر تؤثر على خطوط نمط حيود المسحوق ايضاً.

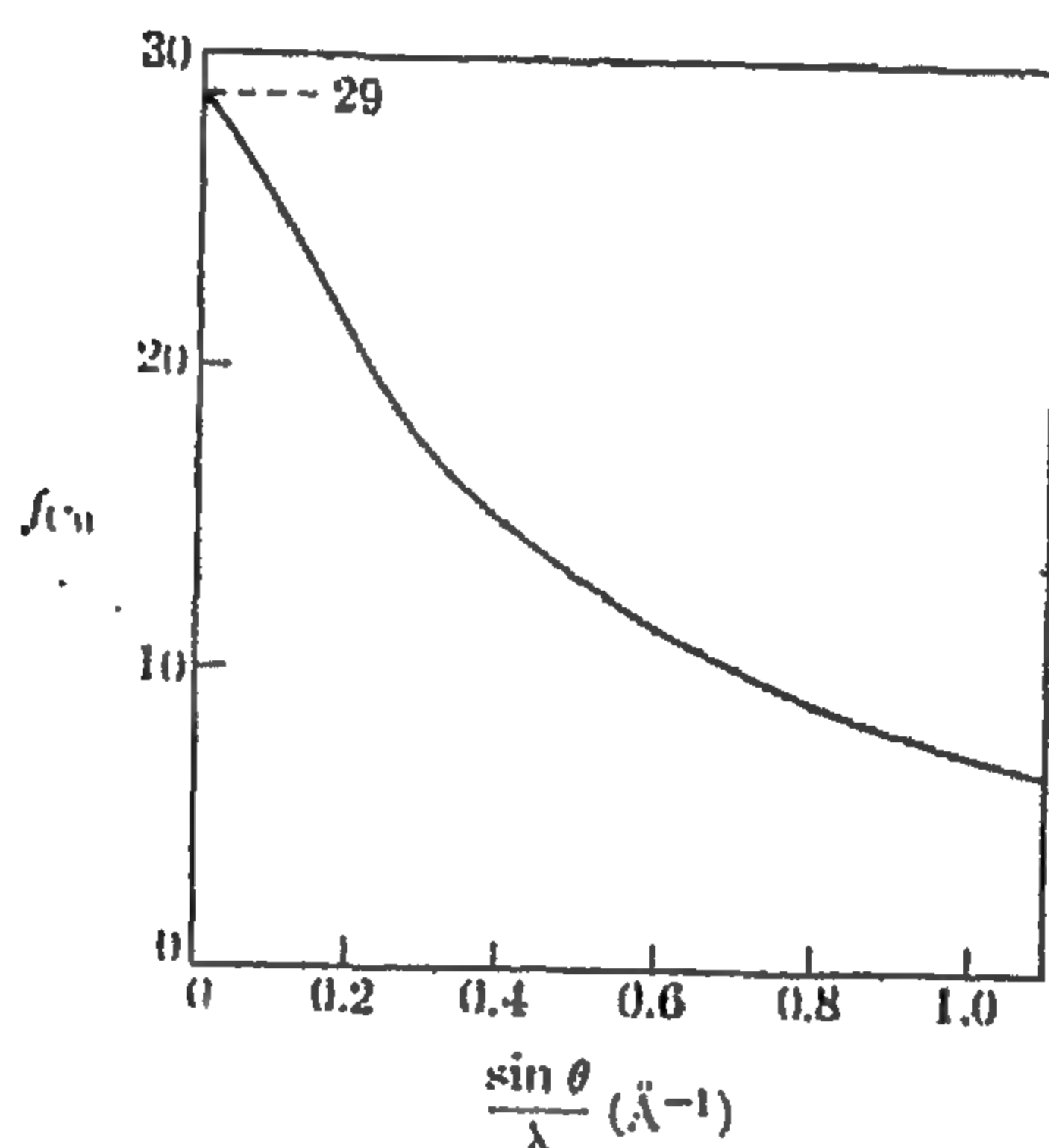
٢-٨-٥ الاستطارة بالإلكترون وبالذرة Scattering by an electron and atom

لو فرضنا ، للإختصار، ان شعاعاً أحادي الموجه من الأشعة السينية سقط على ذره ما فسيحدث نوعان من الاستطارة. تتذبذب الالكترونات المرتبطة بقوة الى الذرة وتبعث اشعة سينية لها نفس الطول الموجي للشعاع الساقط. أما الالكترونات غير المقيدة او الحرة فتستطير جزء من الشعاع الساقط ويزداد طوله الموجي قليلاً في هذه العملية، أما مقدار الزيادة فتعتمد على زاوية الاستطارة. تدعى العملية الأولى استطارة متوافقة او غير محوره والثانية استطارة غير متوافقة او محوره. تحدث كلا العمليتين في آن واحد وبكل الاتجاهات. وإذا كانت الذرة واحدة من مجموعة كبيرة من الذرات مرتبة في الفضاء بصورة منتظمة ومعادة كما في حالة المواد البلورية فستحصل عند ذلك ظاهرة أخرى. فستعمل الاشعة المستطارة بتوافق من كل الذرات على التقوية في اتجاهات معينة وعلى التلاشي في الاتجاهات الأخرى ومن ثم تتولد الاشعة (الحزم) المحادة. فالحيود أساساً هو استطارة متوافقة مقواة.

تستخدم الكمية f والمسماة معامل الاستطارة الذري لوصف كفاءة استطارة ذرة محدده باتجاه معين. يعرف (f) رياضياً بنسبة السعتين وكالاتي

$$f = \frac{\text{سعة الموجه المستطارة من ذرة واحده}}{\text{سعة الموجه المستطارة من الكترون واحد}}$$

يعتمد (f) على زاوية الاستطارة وعلى الطول الموجي عند زاوية معينة . يبين الشكل (23-5) تغير (f) للنحاس مع زاوية الاستطارة والطول الموجي.



الشكل (23-5) معامل الاستطارة الذري للنحاس

٣-٨-٥ الاستطارة بالخلية الاساسية Scattering by a unit cell

للوصول الى صيغة رياضية لشدة الشعاع المحاد يجب الاقتصار على دراسة الاستطارة المتوافقة (Coherent Scattering) من كل الذرات التي تكون البلوره وليس

ذرة واحدة فقط. فالواقع ان الذرات المرتبة بشكل منتظم في الفضاء تعني ان الاشعة المحادة محددة باتجاهات معينة فقط وتسمى الحزم المحادة. تحدد هذه الاتجاهات بقانون براك. فعند عدم تحقق قانون براك فلا يمكن ان يوجد شعاع محاد في حين ان قانون براك يمكن ان يتحقق في بعض مجاميع المستويات الذرية ومع ذلك لا يحدث حيود كما في المثال المذكور في مقدمة هذا البند وذلك بسبب الترتيب الخاص للذرات في داخل الخلية الاساسية.

وبما أن البلورة مكوّنه من خلايا أساسية معاده لذلك تكفي دراسة شدة الشعاع المحاد من خلية أساسية واحده لتمثيل كل البلورة.

تدعى محصلة الموجه المستطاره بكل الذرات في الخلية الاساسية بمعامل البنيه (F) (structure factor)، وذلك لانه يصف كيفية تأثير ترتيب الذرات (بدلالة احداثيات كل ذره u, v, w) على الشعاع المستطار. يتم الحصول على (F) بالإضافة البسيطة للموجات المستطاره من كل ذرة في الخلية الاساسية على حده. فإذا احتوت الخلية الاساسية على 1 و 2 و 3 N من الذرات ولها الاحداثيات u_1, v_1, w_1 و u_2, v_2, w_2 و u_3, v_3, w_3 .. ولها معاملات استطاره ذرية f_1 و f_2 و f_3 ... فعندها يتم التعبير عن (F) ولانعكاس hkl بالآتي:

$$F = f_1 e^{2\pi i(hu_1 + kv_1 + lw_1)} + f_2 e^{2\pi i(hu_2 + kv_2 + lw_2)} + f_3 e^{2\pi i(hu_3 + kv_3 + lw_3)} + \dots \quad (21-5)$$

حيث أن $i = \sqrt{-1}$ وهو مقدار تخيلي

يمكن كتابة المعادلة الاخيرة كالآتي

$$F_{hkl} = \sum_{n=1}^N f_n e^{2\pi i(hu_n + kv_n + lw_n)} \quad \dots \quad (22-5)$$

حيث تمثل N عدد الذرات الموجودة في الخلية الاساسية المدروسة.

تكون (F)، بصوره عامة، عدد مركب (complex number) وهو يعبر عن كل من السعة (A) والطور للموجه المحصلة. تعطي قيمة (F) المطلقة |F| سعة الموجه المحصلة بدلالة سعة الموجه المستطارة بالكترون منفرد وهو يعرف بنسبة السعتين وكالآتي:

$$|F| = \frac{\text{سعة الموجه المستطارة بكل الذرات في الخلية الأساسية}}{\text{سعة الموجه المستطارة بالكترون واحد}}$$

تتناسب شدة الحزم المحادة بكل الذرات في الخلية الاساسية، بالإتجاه المحدد بقانون براك، مع $|F|^2$. يتم الحصول على مربع سعة الحزمة الناتجة و $|F|^2$ بضرب العلاقة الخاصة بالمعامل F (22-5) بمرافقها المركب (Complex conjugate). تعتبر المعادلة (22-5) مهمة جداً في حيود الاشعة السينية لدراسة البلورات لانها تمكّن بوساطة حساب شدة اي انعكاس hkl من معرفة مواقع الذرات.

٤-٨-٥ حساب معامل البنية (F) :

لحساب معامل البنية (F) يجدر هنا التذكير ببعض العلاقات الرياضية المفيدة وهي:

a- $e^{n\pi i} = (-1)^n$

b- $e^{n\pi i} = e^{-n\pi i}$

حيث أن n هي عدد صحيح

تستخدم المعادلة (22-5) لحساب (F) لأية بنية بلورية، على سبيل المثال، (a) حالة البنية البسيطة (كالمكعب البسيط ومتعامد الاضلاع البسيط وغيرها). تحتوي الخلية الاساسية في هذه الحالة على ذرة واحدة في نقطة الاصل، اي أن لها الاحداثيات 000. فيكون معامل البنية:

$$F = f e^{2\pi i (0)} = f$$

ومن ثم

$$F^2 = f^2$$

وحيث ان F^2 لا يعتمد على h و k و l اي هو ثابت لكل الانعكاسات، لذا يعني ذلك انه يمكن حدوث الحيود على كل المستويات الذرية (مستويات الانعكاس) hkl . ومن الجدير بالذكر أن شدة خط الحيود (I) تتناسب طردياً مع $|F^2|$.

(b) حالة الخلية المتمركزة القاعدة التي نوقشت عند بداية البند (١-٨-٥). تحتوي هذه الخلية على ذرتين من نفس النوع ذات الإحداثيات 0 و $\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{2}$ و عليه يكون

$$F = f e^{2\pi i (0)} + f e^{2\pi i \left(\frac{h}{2} + \frac{k}{2} \right)} = f [1 + e^{\pi i (h+k)}]$$

وحيث ان $(h+k)$ هي عدد صحيح دائماً، لذا تكون (F) حقيقيه وليست مركبة (Complex).

فإذا كانت كل من h و k زوجيه او فردية اي غير مختلطة (unmixed) اذن يكون مجموعهما دائماً زوجي ومن ثم تكون قيمة $e^{\pi i (h+k)}$ تساوي واحد .

$$F = 2f \quad \text{or} \quad F^2 = 4f^2 \quad \text{اذن اذا كانت } h \text{ و } k \text{ غير مختلطة فتكون}$$

ومن الجانب الآخر إذا كانت h و k مختلطة اي ان احدهما فردي والآخر زوجي، فإن مجموعهما سيكون فردياً وتكون قيمة $e^{\pi i (h+k)}$ مساوية لسالب واحد (-1).

اذن اذا كانت h و k مختلطة فإن:

$$F = 0 \quad \text{or} \quad F^2 = 0$$

ومن الملاحظ هنا في كلا الحالتين ان قيمة l لا تؤثر على معامل البنية، وعلى

سبيل المثال ، فإن الانعكاسات 111 و 112 و 021 و 022 و 023 كلها تمتلك نفس قيمة F والمساوية $2f$. وبالتشابه فإن الانعكاسات 011 و 012 و 013 و 101 و 102 و 103 لها نفس قيمة معامل البنية F والمساوية للصفر.

(c) حالة الخلية المتمركزة الجسم (body centered cell) والمبينه في الشكل (5-21) b ، تحتوي هذه الخلية على ذرتين من نفس النوع موضوعه في 000 و $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$

وحسب المعادلة (5-25) يكون

$$F = fe^{2\pi i(0)} + fe^{2\pi i \left(\frac{h}{2} + \frac{k}{2} + \frac{l}{2} \right)}$$

$$= f[1 + e^{\pi i(h+k+l)}]$$

عندما تكون قمة المقدار $(h+k+l)$ زوجية فإن $F=2f$

اي يحدث انعكاس في هذه الحالة . $F^2 = 4f^2$

أما عند كون قيمة المقدار $(h+k+l)$ فردية فإن $F = 0$

اي لا يحدث انعكاس في هذه الحالة . $F^2 = 0$

لقد تم بموجب الاعتبارات الهندسية استنتاج حدوث الانعكاس 011 في الخلية متمركزة القاعدة لكنه لا يحدث هذا الانعكاس في الخلية متمركزة الجسم. هذه النتيجة في الواقع على توافق مع معادلات عامل البنية (F) لهاتين الخليتين .

وهكذا يمكن تطبيق معادلة معامل البنية (5-22) لحساب مقداره ومن ثم معرفة الممكن من الانعكاس في كل البنى البلورية.

ويمكن استنتاج بعض القواعد الخاصة بالانعكاسات الممكنة وغير الممكنة لبعض الخلايا البلورية الشائعة واختصارها كما في الجدول (5-2) .

جدول (2-5) الانعكاسات الممكنة وغير الممكنة لبعض البنى البلورية.

بنية الخلية	الممكن وجوده من الانعكاسات	الواجب عدم وجوده من الانعكاسات
- بسيطة Simple	الكل	لا يوجد
- متمركزة القاعده	عند كون h و k غير مختلفه	عندما تكون h و k مختلفه
- متمركزة الجسم	عند كون $(h+k+l)$ زوجيه القيمة	عند كون $(h+k+l)$ فردية القيمة
- متمركزة الوجه	عند كون h و k و l غير مختلفه	عند كون h و k و l مختلفه .

وهكذا يمكن تعيين بنية الخلية الاساسية من الموقع الزاوي (θ) للحيود وتعيين مواضع الذرات (أحداثياتها) في الخلية الاساسية من شدة نقاط او خطوط نمط الحيود . حيث تكون قيمة المعامل $(h^2+k^2+l^2)$ للخلية المكعبة مساوية الى القيم الآتية:

أ- ذات البنية البسيطة S.C. 1 و 2 و 3 و 4 و 5 و 6

ب- ذات البنية المتمركزة الجسم BCC. 2 و 4 و 6 و 8 و 10 و 12 و 14

ج- ذات البنية المتمركزة الوجه FCC 3 و 4 و 8 و 11 و 12 و 16

د- بنية بلورة الماس 3 و 8 و 11 و 16

ويمكن الرجوع الى المصادر الموجودة في آخر الكتاب للإطلاع على طرائق تعيين ادلة ملر لانماط الحيود لمختلف انواع البلورات.

٥-٩ تحليل الحيود

٥-٩-١ المقدمة:

لقد تم ذكر ان نمط الحيود هوخاصية من خواص المادة والتي يمكن تشخيصها بواسطتها تماماً كطبع الاصابع بالنسبة للأشخاص . فلو فرض ان هناك عدد كبير من أنماط الحيود ومن مواد مجهولة، فالطريقة هي ان تقارن هذه الانماط مع انماط الحيود من المواد المعروفة وعند التطابق يتم تشخيص المادة. ولكن ذلك يتطلب وجود اعداد كبيرة جداً من أنماط الحيود ولكافة المواد تقريباً، مما يجعل هذه الطريقة صعبة وغير عملية. لذلك تم اعتماد نظام (System) لتصنيف انماط الحيود المعروفة وفقاً لبعض المعايير، وبذلك تكون المقارنة والتشخيص سريعين نسبياً.

لقد ابتدع هنوالت (Hanawalt) سنة 1936 نظاماً يمكن بواسطته اجراء المقارنة لتشخيص المواد من أنماط الحيود الخاصة بها، لان كل خط حيود يتميز بزاوية (2θ) وشدة (I) معينين. ولكن الزاوية (2θ) تعتمد على طول موجة الأشعة المستخدمة في الفحص (λ) ، لذلك تم استخدام عامل اساسي آخر هو المسافة البينية (d) بين المستويات الذرية التي تحدد بموقع خط الحيود ايضاً. صنف هنوالت انماط الحيود، بناءً على ذلك، بجدولة قيم (d) والشدة النسبية (I) لخطوط الحيود في كل نمط. تم ترتيب الانماط المعروفة وفقاً لقيم (d) التناقضية للخطوط ذات الشدة العالية. تجعل هذه الطريقة تطابق النمط المجهول مع النمط المعلوم سهلاً وسريعاً. كما ان لهذه الطريقة فائدة اضافية وهي عدم الحاجة لتعيين البنية البلورية (crystal structure) للمادة في كل حالة.

٥-٩-٢ طريقة هنوالت:

بدأ هنوالت ومساعدته عملية جمع أنماط الحيود المعروفة للمواد. حيث تمكنوا من

الحصول على أنماط حيود الف مادة تقريباً تبعهم بعد ذلك بعض الجمعيات العلمية العالمية. أمكن جمع وتبويب المعلومات في بطاقات 3x5 انج، كتلك الموجودة في الشكل (5-24) ، لحوالي 6000 مادة تتراوح بين المعادن والسبائك الى المواد العضوية وغير العضوية.

تتشابه الى حد كبير قيم (d) للخطوط الأولى من الحيود ذات الشدة العالية، ولذلك بدأ هنوالت بفحص كل مادة بقياس قيم (d) لثلاث خطوط ذات الشدة العالية اي d_1 و d_2 و d_3 وبذلك ضمن عدم تداخل انماط الحيود المتشابهة المسافة البينية الأولى (d_1). وقد خصص لكل مادة في هذا النظام بطاقة خاصة تحتوي على كثير من المعلومات الخاصة بالبنية. تصاحب هذه البطاقات دليل للإستعمال واستخلاص المعلومات منه (ASTM diffraction data).

٣-٩-٥ أسلوب تحليل نمط الحيود بهذه الطريقة:

هناك عدة أنماط مهمة يجب اتباعها لتشخيص نمط الحيود لمادة مجهولة وهي:

١- يجب ترتيب الشدة النسبية $\frac{I}{I_0}$ وقيم d لنقاط او خطوط الحيود المقاسة عملياً من نمط حيود المادة المجهولة حيث ان I_0 هي شدة اعلى خط.

٢- يتم البحث عن قيم مجموعة d_1 في دليل البطاقات .

٣- يتم البحث عن قيم المجموعتين d_2 و d_3 لايجاد اقرب تطابق مع القيم العملية ولا بد من تجاوز التفاوت بحدود (0.01 \AA).

بعد اكتشاف التوافق في قيم d_1 و d_2 و d_3 المقاسة والواردة في الدليل تتم مقارنة الشدة النسبية لنقاط او خطوط الحيود العائدة لقيم d_1 و d_2 و d_3 وعند التطابق يكون التشخيص قد اكتمل .

٤-٩-٥ خاتمة:

الواقع انه في الوقت الحاضر وبعد ان حوسبت (Computerised) اجهزة المطياف (سواء EDS أو WDS) وكذلك المحياد ، فإن طيف المادة او نمط حيودها يحل بواسطة البرامجيات (soft ware)المهيأ مسبقاً لذلك وحسب الشركة المصنعة للجهاز .وبناء على نفس الاسس التي تم شرحها . لذلك لا توجد الآن صعوبة في تحليل المواد كخامات المعادن والفوسفات والبوتاس وغيرها اضافة الى المعادن والسبائك وبنسب عالية من الدقة وخصوصاً عند توفر النماذج القياسية .

5-628

1	2	3	4	
d	2.82	1.99	1.63	3.26
I/I ₁	100	55	15	13
NaCl				
Sodium Chloride				
(Halite) ★				
Rad. CuKα ₁ λ	1.5405		Filter	Ni
Cutoff	I/I ₁		Dia.	
Ref. Swanson and Fuyat, NBS Circular 539, Vol. 2, 41 (1953)				
Sys. Cubic	S.G.		Fm3m (225)	
a ₀ 5.6402	b ₀	c ₀	A	C
α	β	γ	Z	D _x 2.164
Ref. Ibid.				
ε _α	D	n _ω β	ε _γ	Sign
2V		mp	Color	Colorless
Ref. Ibid.				
An ACS reagent grade sample recrystallized twice from hydrochloric acid.				
X-ray pattern at 26°C.				
Merck Index, 8th Ed., p. 956.				
d A	I/I ₁	hkl	d A	I/I ₁
3.258	13	111		
2.821	100	200		
1.994	55	220		
1.701	2	311		
1.628	15	222		
1.410	6	400		
1.294	1	331		
1.261	11	420		
1.1515	7	422		
1.0855	1	511		
0.9969	2	440		
.9533	1	531		
.9401	3	600		
.8917	4	620		
.8601	1	533		
.8503	3	622		
.8141	2	444		

FORM M-2

الشكل (24-5) النموذج القياسي 3x5 in لبطاقة معلومات الحبيود الخاصة بمادة (NaCl). يظهر في البطاقة (1) رقم الملف (2) ثلاثة خطوط لاقوى شدة (3) خط الزاوية الأقل (4) الصيغة الكيميائية واسم المادة (5) معلومات حول طريقة الحبيود المستخدمة (6) معلومات عن الماهية البلورية للمادة (7) معلومات اضافية ضوئية اخرى (8) معلومات عن النموذج و (9) نمط الحبيود. تم التعبير عن شدة الحبيود بالنسبة المتوى لأقوى شدة (I₁) وهي شدة الخط الثاني في هذه المادة. لمعظم البطاقات رمز في الزاوية اليمنى العليا الذي يرمز الى نوعية المعلومات.

تمارين الفصل الخامس

- ١- في نمط حيود أحد العناصر الذي بنيته البلوريه على هيئة مكعب متمركز الوجه FCC، كانت مقادير زاوية الحيود (θ) للخطوط الثلاثة الاولى 22° و 26.3° و 37.4° ، حدد ذلك العنصر، علماً ان الاشعة السينية المستخدمة هي $\text{Cu-}k\alpha$.
- ٢- جد قيمة 2θ وأدلة ملر لخطوط الحيود الثلاثة الاولى ذات الزوايا الصغيرة في نمط حيود المسحوق للمواد التي لها الانظمة البلورية التالية:
 - أ- مكعب بسيط: ($a=3\text{\AA}$)
 - ب- مكعب متمركز الجسم ($a=2\text{\AA}$)
 - ج- رباعي بسيط ($a=3\text{\AA}$, $c=2\text{\AA}$)
- ٣- علماً بأن الاشعة السينية الاحادية المستخدمة كانت $\text{Cu-}k\alpha$.
 - ٣- سقطت حزمة من الاشعة السينية بصوره أفقيه وموازيه للمحور [010] وعمودية على المحور [100] لبلوره مكعبة البنية، طول حرف (ضلع) خليتها الاساسية (6\AA) اذا علمت ان المحور [001] كان موازياً لشريط الفلم الذي يبعد عن البلورة (5 cm)، حدد مواقع يقع الحيود على الفلم.
- ٤- تم الحصول على نمط الحيود لمسحوق الالمنيوم باستخدام الاشعة السينية ($\text{Co}k\alpha$). كانت مربعات جيوب زوايا خطوط الحيود ($\sin^2\theta$) هي 0.0818 و 0.1091 و 0.2182 و 0.3274. جد أدلة ملر لخطوط الحيود المذكورة ثم احسب ثابت البلوره.
- ٥- اشتق علاقة بسيطة لمربع معامل البنية الذرية (F^2) للماس بضمنها القواعد التي تتحكم بالانعكاسات المشاهدة. بنية هذه البلورة مكعبة وتحتوي على 8 ذرات كربون، في كل خلية أساسية، متموضعة في الاماكن ذات الاحداثيات التالية:

$$000, \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0, \frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}, 0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}, \frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}, \frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}, \frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}, \frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}.$$

٦- جد معادلة بسيطة لعامل البنية الذرية (F) وقيم 2θ للخطوط الأربعة الأولى من نمط حيود المسحوق المرئية ($F^2 \neq 0$) باستخدام الأشعة السينية ($\text{CuK}\alpha$) للبنيتين التاليتين:

أ- خلية رباعية الأضلاع متمركزة القاعدة تحتوي على ذرتين احداثياتهما $0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}$ و 000 وطول احرفها $a=2\text{\AA}$ و $c=3\text{\AA}$.

ب- خلية رباعية بسيطة تحتوي على ذرة واحدة عند 000 .

٧- بلورة رباعية الأضلاع (tetragonal) تحتوي على أربعة ذرات من نوع واحد في الخلية الأساسية الواحدة، تتموضع عند $0 \frac{1}{2} \frac{1}{4}$ و $\frac{1}{2} 0 \frac{1}{4}$ و $\frac{1}{2} 0 \frac{3}{4}$ و $0 \frac{1}{2} \frac{3}{4}$:

أ- اشتق علاقة بسيطة للعامل (F^2).

ب- ماهي شبكية برفاس لهذه البلورة.

ج- ماهو مقدار (F^2) للانعكاسات التالية 100 و 002 و 111 و 011 .

الفصل السادس

المجهر الضوئي

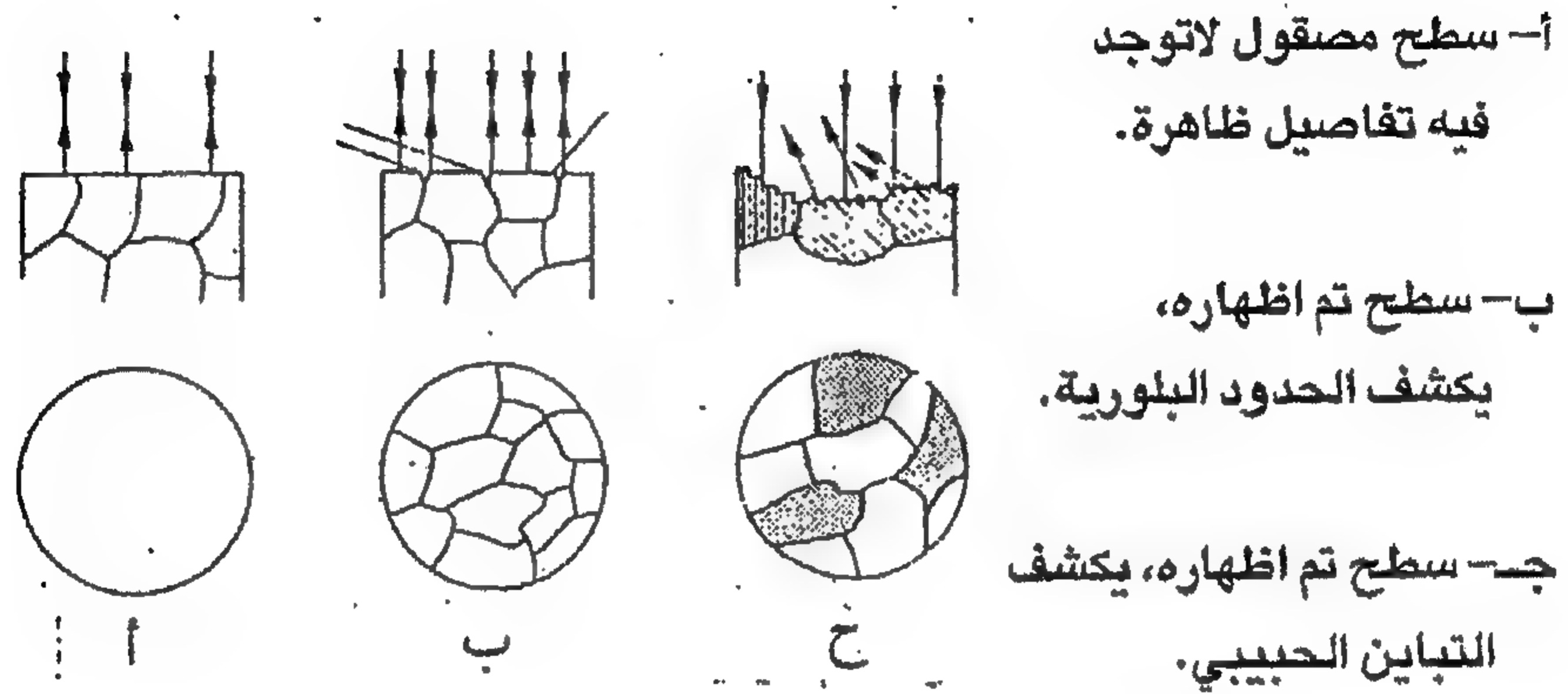
٦-١ المقدمة:

لقد مرّ علينا أن الضوء هو موجات كهرومغناطيسية من حيث طبيعته. فهو اذن ينتقل بسهولة في الفراغ وكذلك في الأوساط الشفافة كالهواء والماء ، لكنه يعاني من الانعكاس والانكسار عند انتقاله من وسط الى آخر. يخضع الضوء الى قوانين ثابتة في الانعكاس والانكسار شأنه في ذلك شأن بقية الامواج الاخرى. ان الطول الموجي للضوء المرئي يقع بين 4000\AA للضوء البنفسجي و 7000\AA للضوء الأحمر. فالضوء الأبيض هو مزيج من سبعة الوان رئيسية هي الوان الطيف الشمسي السبعة المعروفة وهي الاحمر و البرتقالي والاصفر والاخضر والازرق والنيلي والبنفسجي وحسب الطول الموجي ابتداء من الأكبر وصولاً الى الاصغر.

سمي المجهر الضوئي بهذا الاسم لانه يستخدم الضوء في اضاءة النموذج المراد فحصه.

وحيث ان المعادن ، وأغلب المواد ، معتمة (غير شفافة للضوء) وجب لذلك ان يتم فحصها بوساطة الضوء المنعكس عنها كما في الشكل (6-1) بحيث أن مصدر الضوء يجب أن يكون داخل انبوب المجهر نفسه. ويتحقق هذا عادة بوضع عاكس من لوح زجاجي بسيط ورقيق وصغير داخل الانبوب . ولأن من الضروري للضوء الراجع ان يمر خلال العاكس ، فالعاكس يجب ان يصنع من زجاج غير مفضض (أو مفضض جزئياً) . وهذا يعني ان اغلب كمية الضوء المتوفرة سوف تفقد، بالنفاذ خلال الزجاج عندما يسقط الضوء على اللوح وبالإنعكاس عندما يسقط الشعاع الراجع من النموذج على اللوح مرة ثانية. ومع ذلك ، فمصباح صغير ذو 6V يعطي

اضاءة كافية. تتم السيطرة على قطر الشعاع الضوئي بواسطة حاجز الفتحة القزحية (diaphragm) الذي يجب ان يكون مغلقاً جزئياً حتى يكون القطر كافياً ليغطي الجزء الخلفي من العدسة الشيئية فقط. ان الضوء الزائد المنعكس من جانب انبوب المجهر يسبب تشتت الضوء وكنتيجة لذلك يحدث توهجاً في مجال الرؤية، مؤدياً الى فقدان تباين الصورة ودقتها.



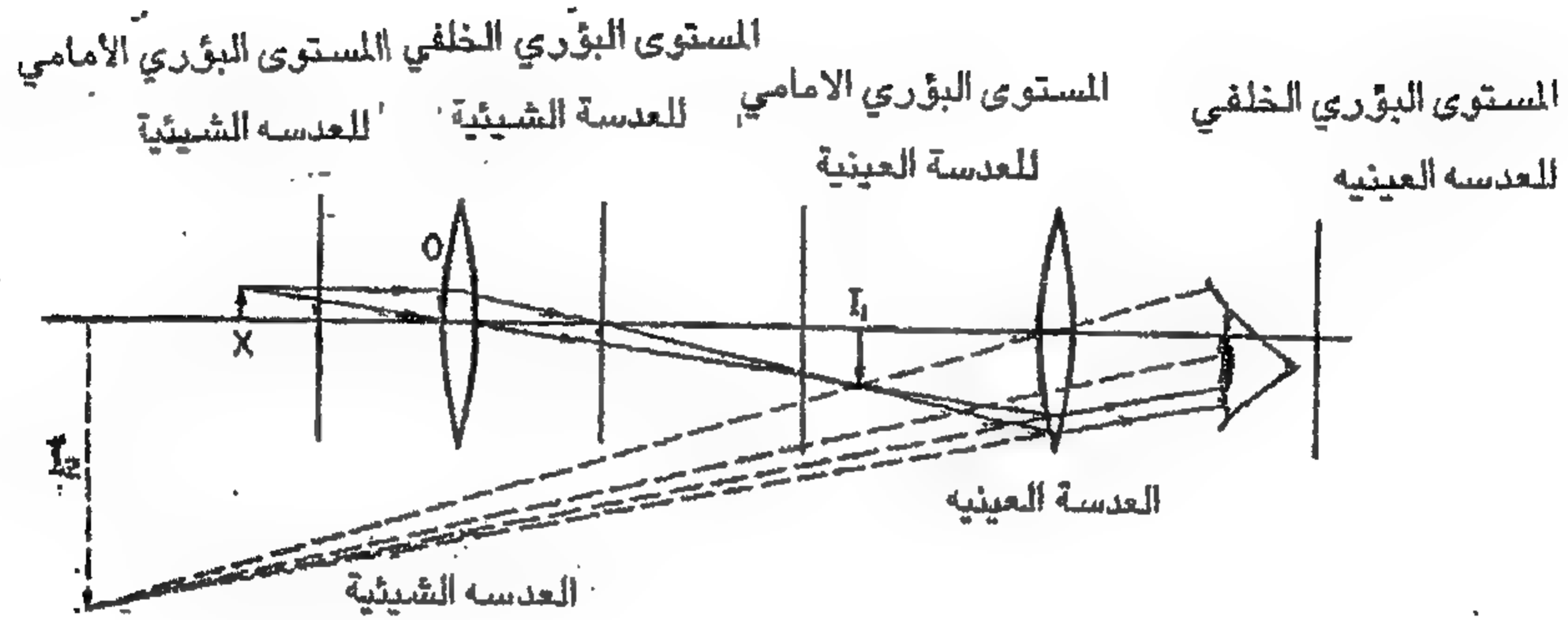
الشكل 1-6 كيفية انعكاس الضوء من سطوح معدن محضّر.

٢-٦ أنواع المجهر الضوئي وتركيبه:

يقسم المجهر الضوئي الى نوعين حسب طبيعة عملهما

١- المجهر الضوئي النافذ Transmission Optical Microscope

٢- المجهر الضوئي العاكس Reflected Back Optical Microscope



الشكل (2-6) مخطط يبين كيفية تكون الصورة

في المجهر الضوئي المركب.

يستخدم الأول في حقول علم الاحياء وأحياناً في الجيولوجيا والبوليمر. ويستخدم الثاني، وهو موضوعنا في هذا الفصل، في حقل هندسة المعادن والمواد في الغالب اما من حيث اساس تكوين الصورة في المجهرين فهو نفسه.

يبين الشكل (2-6) رسماً تخطيطياً لمجهر عاكس مركب وكيفية تكون الصورة فيه. يتكون هذا المجهر بالأساس من عدستين لامتين تسميان العدسة الشيئية والعدسة العينية. فالشيئية هي اهم هاتين العدستين لانها يجب ان تبين التفاصيل الدقيقة للبنى المراد فحصها. وهناك عدسات شيئية متوفرة بأبعاد بؤرية هي 2 و 4 و 8 و 16 و 32 من المليمترات، حيث يتراوح تكبيرها من حوالي 4 أضعاف الى 95 ضعفاً. وفي حين ان العين المجردة لاتستطيع اظهار مسافات اقل من 0.1mm ،

فالتكبير بوساطة المجهر يجب ان يزودنا بتفاصيل واضحة في الاقل لغاية هذا المقاس (الحد . وبالإضافة الى التكبير ، فقدرة التمييز (Resolving power) مهمة أيضاً. أما الغرض من العدسة العينية فهو لتكبير الصورة المتكونة من قبل العدسة الشيئية. والعدسات العينية مصنعة بحيث تعطي عدد معين من مقادير التكبير (magnification) على سبيل المثال، 5 أضعاف و 10 أضعاف و 15 ضعفاً.

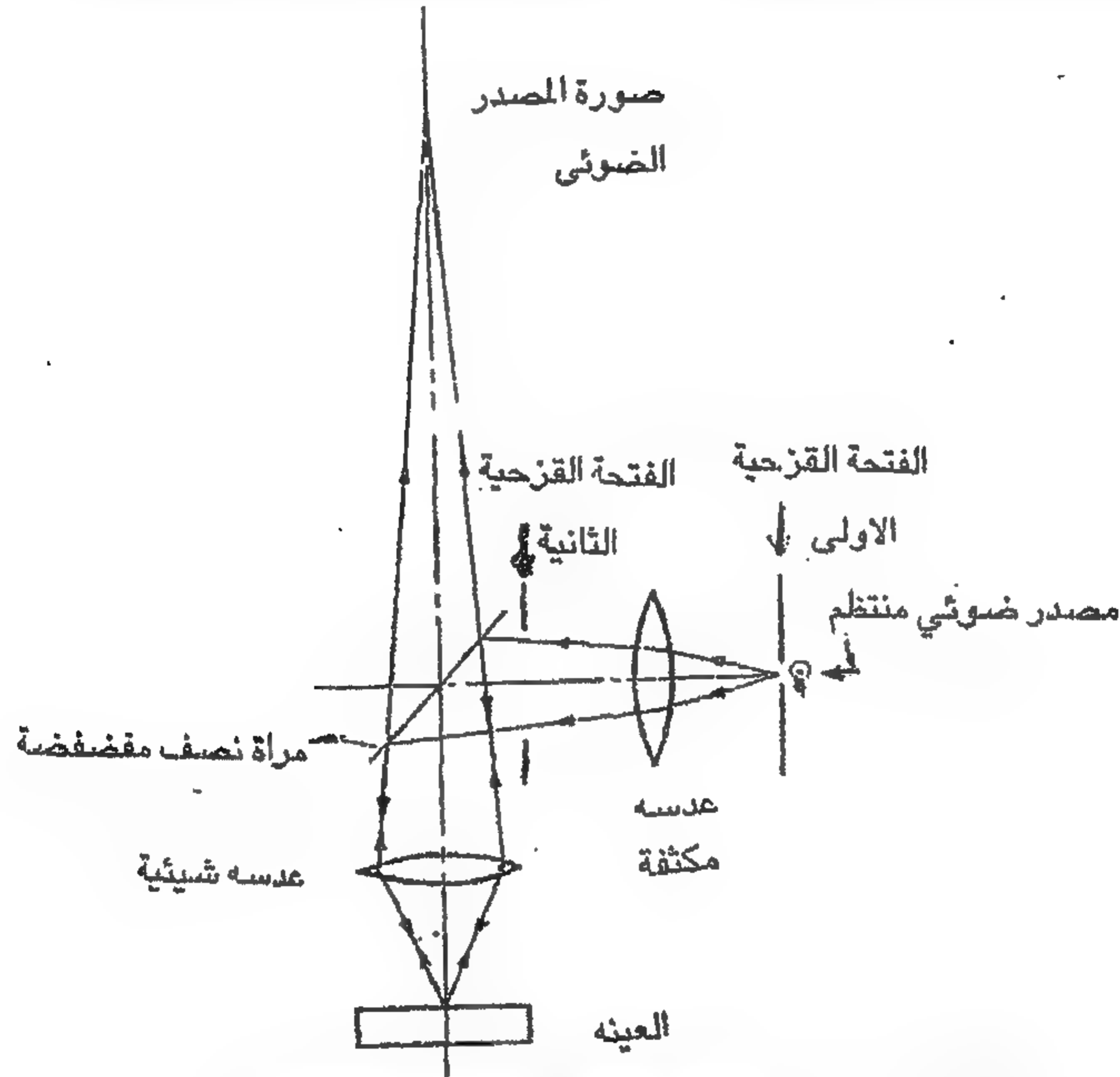
والمسافة الفاصلة بين العدستين الشيئية والعينية تدعى طول انبوب المجهر وهي عادة بحدود 200mm . يمكن ان يحسب مقدار التكبير التقريبي للمجهر الضوئي من العلاقة التالية:

$$\text{التكبير} = \frac{\text{قدرة التكبير للعدسة العينية} \times \text{طول انبوب المجهر (mm)}}{\text{البعد البؤري للعدسة الشيئية (mm)}}$$

يكون موضع العدسة الشيئية امام الجسم على مسافة اكبر من بعدها البؤري (f_o) لكنها أصغر من ($2f_o$) تتكون للجسم صورة مقلوبة ومكبرة في الجهة الثانية من العدسة الشيئية (I_1) . تكون المسافة بين العدستين الشيئية والعينية بحيث ان الصورة (I_1) تبعد عن العينية بمسافة اقل من بعدها البؤري (f_e) حيث ان f_e يمثل البعد البؤري للعينه.

تكوّن العدسة العينيه صورته خيالية معتدلة مكبرة (I_2) للصورة (I_1) والاخيرة تعتبر جسماً بالنسبة للعدسة العينية. ان الصورة (I_2) هي الصورة النهائية التي ترى من قبل عين الناظر (الفاحص).

يمكن ان تكون إضاءة النموذج مائلة عند كون الشيئية ضعيفة القدرة التكبيرية حيث تكون المسافة بين النموذج والعدسة كبيره نسبياً أو تكون عمودية عند استخدام عدسة شيئية عالية القوة التكبيرية حيث تكون المسافة بين العدسة والنموذج صغيرة. يوضح الشكل (3-6) مخطط مجهر الاضاءة العمودية.



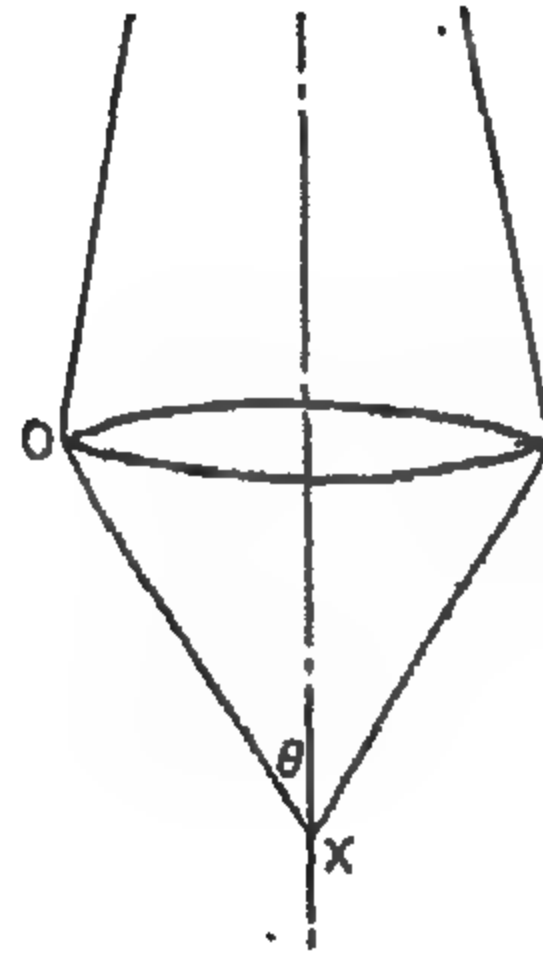
الشكل (3-6) مخطط لمجهر الاضاءة العمودية.

يمكن الحصول على أحسن أداء للمجهر عند تحقيق ما يدعى بالإضاءة الحرجة (critical illumination) والتي عندها تصبح تمام فتحة العدسة الشيئية مضاءة وبشكل كامل تماماً لا أكثر وفي الوقت نفسه فإن المصدر الضوئي يبتثر (focused) أو يتم تركيزه على سطح النموذج.

ذكرنا ان أهم جزء في المجهر هو العدسة الشيئية والوظيفه الرئيسية لها هي جمع أكبر كمية من الضوء القادم من أي جزء من الجسم. ويرمز لمقياس المقدرة على تجميع الضوء بالفتحة العددية (N.A.) (numerical aperture) حيث أن :

$$N.A = \mu \sin \theta \quad \dots\dots\dots (1-6)$$

حيث يمثل μ دليل الانكسار للوسط المقابل للشيئية (بين الجسم والشيئية) و θ زاوية نصف الفتحة الضوئية، لاحظ الشكل (4-6).



الشكل (4-6) العدسة الشيئية (0) تقابل النموذج λ بزاوية مقدارها θ .

ومن الواضح من المعادلة (1-6) انه لو أريد زيادة الفتحة العددية فيمكن زيادتها بتبديل الهواء بمادة لها دليل انكسار اكبر كزيت الارز او زيادة الزاوية (θ).

٣-٦ قدرة التمييز Resolving Power

تُعرّف قدرة التمييز بأنها المقدرة على كشف تفاصيل البنية المتقاربة جداً وإظهارها بشكل منفصل واضح. وتكتب رياضياً كالآتي:

$$R.P. = \frac{2 N.A}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

تمثل (λ) الطول الموجي للضوء المستخدم. إن الكمية الأكثر استعمالاً من قدرة التمييز هي حد التمييز (δ) وهي أصغر مسافة بين خطين بحيث يظهران كخطين منفصلين وتساوي رياضياً معكوس قدرة التمييز ، اي :

$$\delta = \frac{I}{R.P} = \frac{\lambda}{2 N.A} \quad \dots\dots\dots (3-6)$$

ومن هنا يتبين ان الفتحة العددية للعدسة الشيئية هي الخاصية الأكثر أهمية وليس قوة التكبير. فمتى تم الوصول الى حد التمييز الأدنى للجهاز فلا معنى لزيادة التكبير لانه سوف لن تظهر معالم اضافية عند التكبير الاعلى ، تماماً كما هو الحال عند تكبير الصورة السالبة (الفلم) في جهاز طبع الصورة.

يظهر بوضوح من المعادلة (3-6) ان حد التمييز يتناسب بشكل مباشر مع الطول الموجي للأشعة المستخدمة. فكلما كان الطول الموجي اقصر كلما أمكن رؤية تفاصيل أكثر دقة (تقارباً) في النموذج المفحوص.

مثال: لو فرض ان الضوء المستخدم في اضاءة النموذج هو الاخضر، طوله الموجي (λ) 500nm و أن قيمة θ هي 80 ودليل الانكسار (μ) يساوي (1) للهواء.

فيكون مقدار حد التمييز بحدود 250nm اي بمقدار نصف الطول الموجي المستخدم تقريباً ، هذه القيمة النظرية (المحسوبة) هي أقل بكثير مما يلاحظ عملياً في المجهر الضوئي، فلماذا هذا الاختلاف؟!

الواقع ان سبب الاختلاف هو وجود عيب في العدسات.

٤-٦ عيوب العدسات الضوئية (Defects of Optical Lenses)

لا يُظهر المجهر الضوئي في الحقيقة صوراً تامة (اي تحاكي النموذج تماماً). لأن العدسات الضوئية تعاني من بعض العيوب او عدة انواع من الزيغ وهي :

- ١- الزيغ الكروي . ٢- زيغ الفارزة (Coma) . ٣- اللابؤرية . ٤- تقوس المجال
- ٥- التشوه . ٦- الزيغ اللوني.

تعيق هذه العيوب استخدام العدسات البسيطة في الأجهزة الضوئية وستناقش هذه العيوب باختصار لبيان امكانية التخلص منها او تقليل قيمها الى مقادير يمكن قبولها.

تم تعريف الزيغ الكروي بأنه الفرق في موضع تبئير الأشعة القادمة من مناطق مختلفة من العدسة الشكل (5-6) (a). فتكون الأشعة الساقطة قريباً من المحور الأساس للعدسة صورة على المحور عند نقاط أبعد عن العدسة من الصورة التي تكونها الأشعة الساقطة بعيداً عن المحور. يسمى هذا الزيغ بالزيغ الكروي الموجب (Positive spherical aberration). أما اذا كانت الأشعة القريبة من المحور نقطاً

بؤرية أقرب مما تكونه الأشعة البعيدة عن المحور فيدعى عندئذ بالزيغ الكروي السالب ، يتم اختزال او تقليل الزيغ الكروي، عادة، بوضع حجاب ضوئي (فتحة متغيرة) (diaphragm) امام العدسة بحيث يسمح للأشعة القريبة من المحور الاساسي فقط بالمرور لتكوين الصورة. ان المأخذ الوحيد لهذه الطريقة هو أنها تقلل من شدة اضاءة الصورة لأنه سيفقد بعض الضوء . اما الاختيار الثاني فيتم استخدامه في العدسات الشبكية المغمورة بالزيت (عند تطلب التكبير العالي) وهو أن يوضع الجسم عند النقطة اللازيغية (aplanatic point). فتكون الصورة في هذه الحالة خالية من الزيغ الكروي (وزيغ الفارزة ايضاً) من دون الاضرار الى استعمال الحجاب اي من دون اختزال للإضاءة.

إذا صحح زيغ العدسة الكروي بالنسبة للأجسام الواقعة على المحور الأساس فسيظل هناك زيغاً كروياً بالنسبة للأجسام الواقعة خارج المحور الاساس.

يُعرف هذا العيب بزيغ الفارزه (Coma aberration) كما في الشكل (5-6) (b) حيث يزداد قطر الصورة كلما ابتعدت الأشعة عن المحور الأساس للعدسة. تتألف الصورة الكاملة في هذه الحالة من سلسلة متداخلة من الصور الدائرية ذات الاقطار المتدرجة بازدياد ابتداءً من I_1 نحو الخارج. تكون شدة الضوء العظمى عند I_1 لتقل

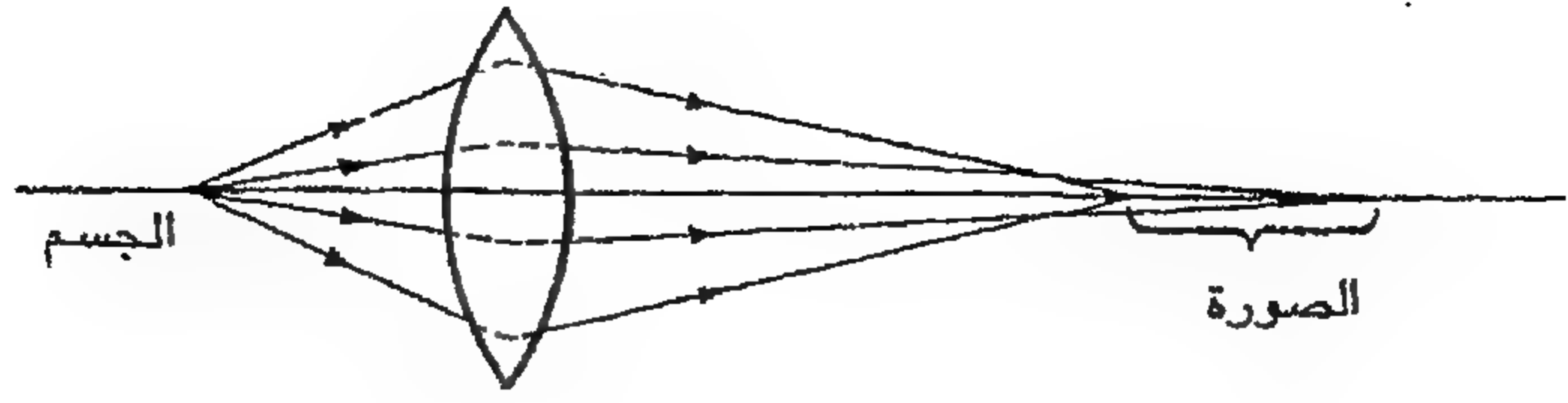
كلما ابتعدنا نحو الخارج . تقل حدة هذه الظاهرة اذا استخدمت فتحة ضوئية لمنع الاشعة المارة في المناطق الخارجية من العدسة. تتصف صورة الجسم النقطي بعيداً عن المحور الاساس بخطين بؤريين مع دائرة ذات أقل تشويه بينهما . يعرف هذا العيب باللابؤريه (astigmatism) كما هو موضح بالشكل (5-6) (c) تكون الاشعة المماسه* OM (tangential rays) و OM' الصورة المماسية (I_T) وتكون الأشعة السهمية (Sagittal rays) الصورة السهمية (I_S) . تتكون الصورة الافقية الخطية عند I_T و الصورة الخطية الموضوعة في المستوى المماس بزاوية عمودية على الشعاع الأساس عند I_S .

تقع الدائرة الاقل تشويهاً بين الصورتين وعندها يتم الحصول على أحسن صورة ممكنة.

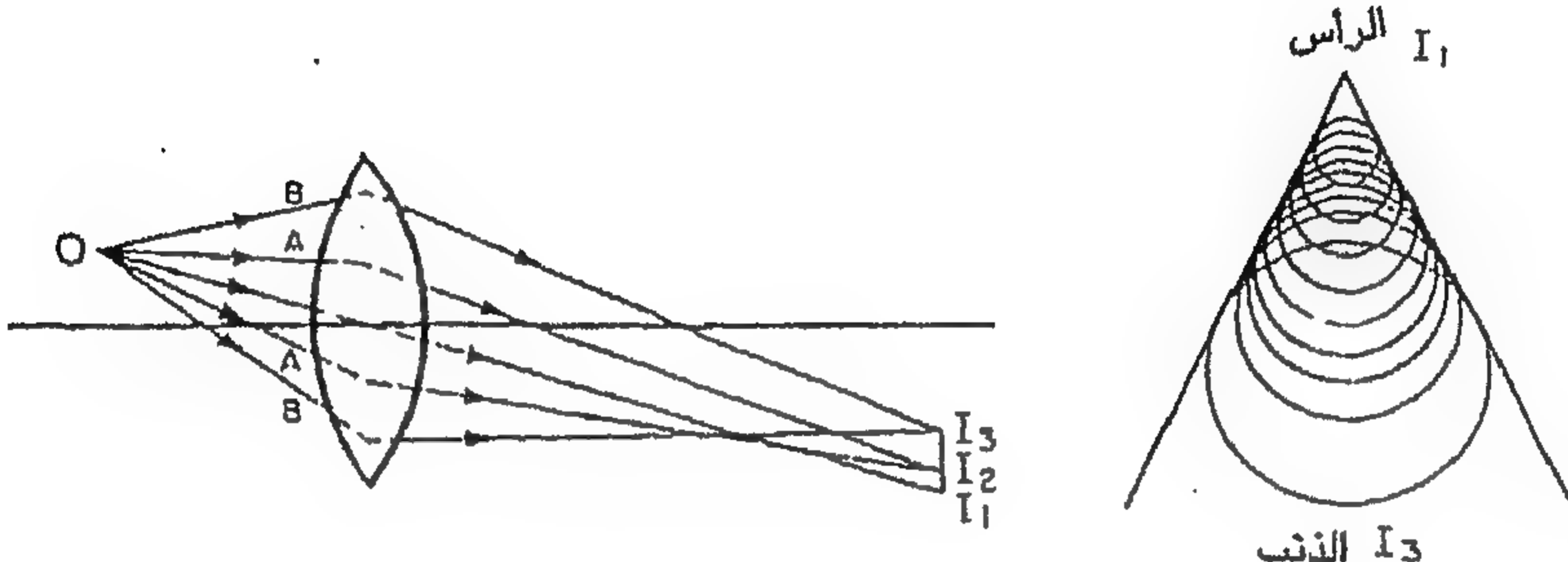
يؤدي العيب المعروف بانحناء المجال (curvature of field) الى تقوس صورة الجسم المستوي. يتكون هذا التقوس بسبب تغير البعد البؤري للعدسة كلما ابتدع الجسم النقطي عن المحور الاساس للعدسة. ويعتمد هذا العيب نتيجة لذلك على دليل الانكسار ونصف قطري التكور للعدسة. يمكن التخلص من هذا العيب بالتصميم الدقيق.

ينشأ هذا التشويه بسبب تغير التكبير مع زيادة ابتعاد الجسم عن المحور الضوئي . فإذا قل التكبير بزيادة المسافة عن المحور، فالمناطق الخارجية للصورة ستكون ذات قياس صغير فينتج عن ذلك تشويه البرميل (barrel distortion). اما إذا زاد التكبير كلما زادت المسافة عن المحور الضوئي، فالأجزاء الخارجية للصورة ستكون ذات قياس اكبر لينتج عن ذلك تشويه وسادة الدبابيس (Pin - cushion distortion) كما في الشكل (5-6) (d) .

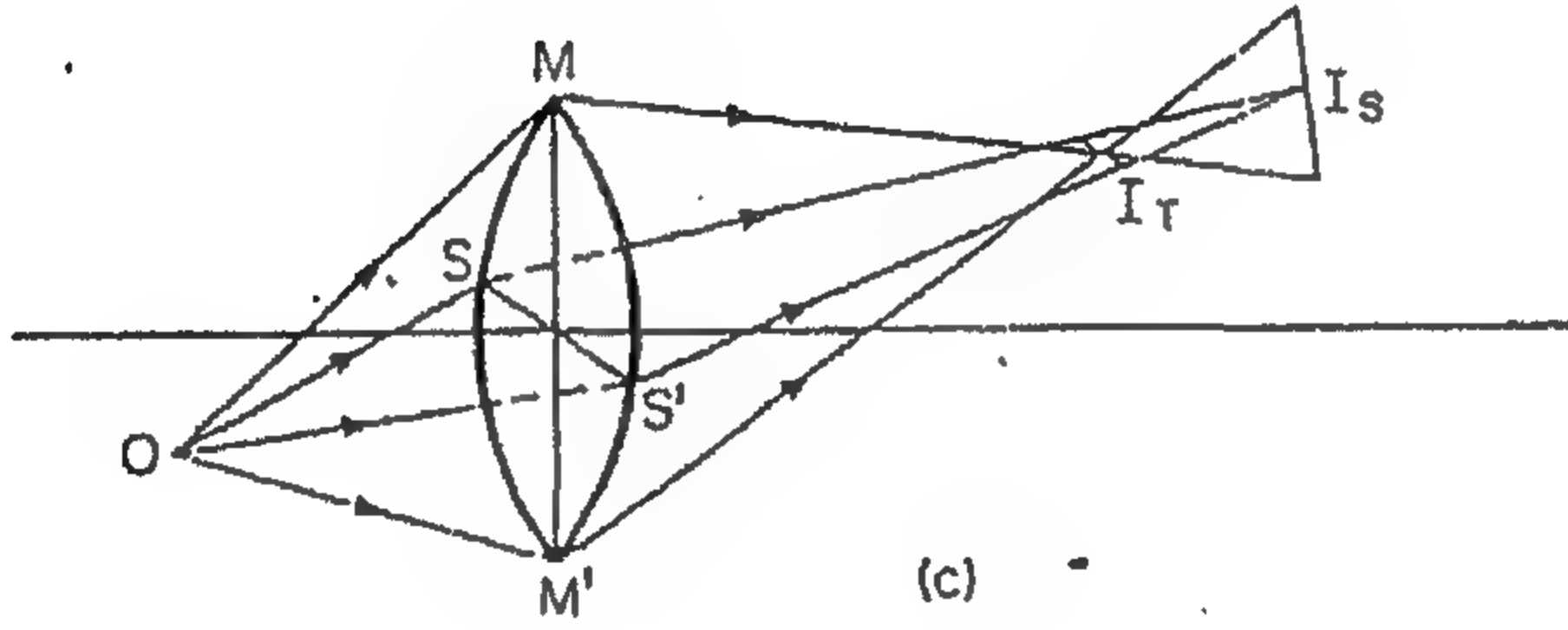
* يحدد القطر العمودي MM' للعدسة والقطر الافقي SS' المستويين المماسي والسهمي على التعاقب.



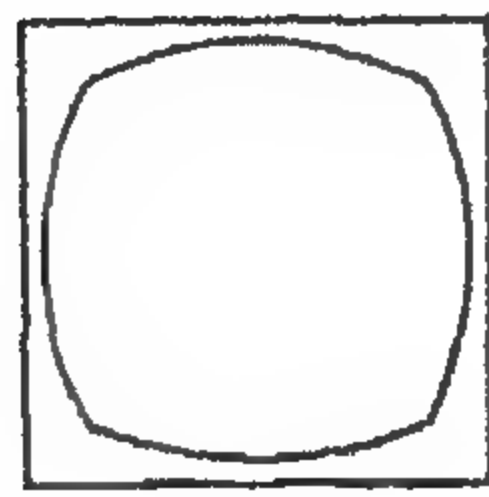
(a)



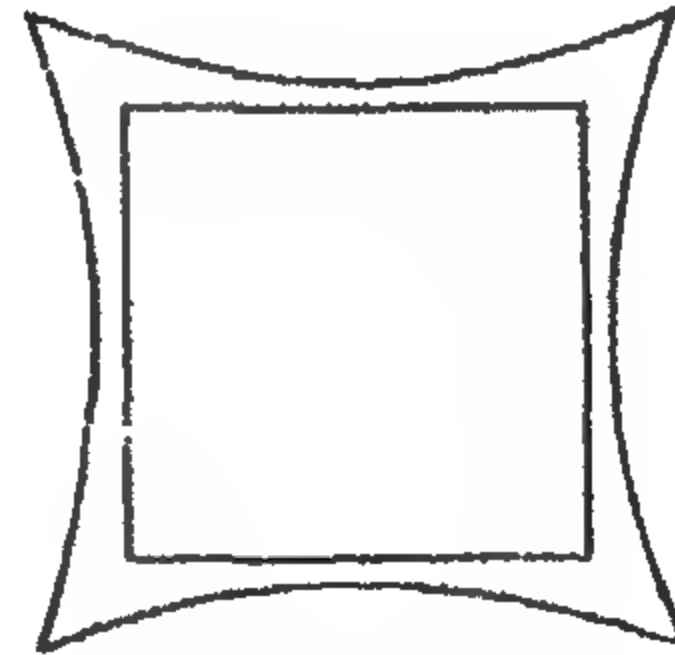
(b)



(c)



البرميل



ومادة دبابيس

(d)

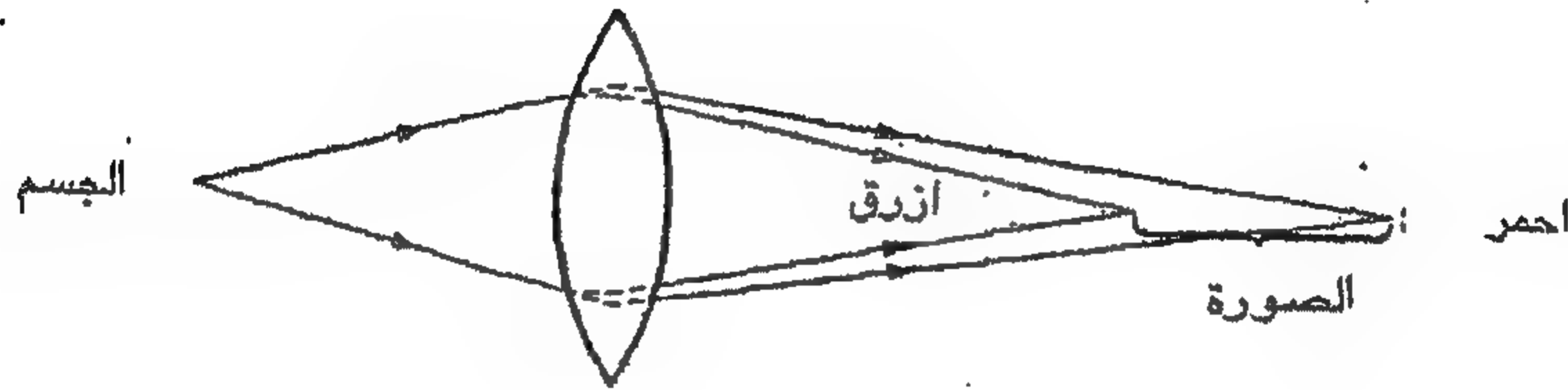
الشكل (5-6) عيوب العدسات (a) الزيغ الكروي

(b) زيغ الفارزة (c) اللابؤرية (d) التشويه.

يتولد هذا التشويه عند منع الشعاع الاساس القادم من الجسم الواقع خارج المحور من الدخول الى العدسة بواسطة حابس عدسة (lens stop) ولذلك تستخدم حابسات اوسدادات ضوئية متموضعة بصورة ملائمة لمنع حدوث هذا التشويه.

تبدي كل أنواع الزجاج خواص تشتيتيه للضوء اي أن دليل الانكسار غير متساوي للأطوال الموجية المختلفة في الطيف المرئي (الضوئي) . وعليه تكون الصورة المتكونة من الاشعة ذات الطول الموجي الاطول ابعد عن العدسة المحدبة من الصورة المتكونة من الاشعة ذات الطول الموجي الاقصر. لذا تظهر صورة الجسم النقطي المضاء بالضوء الابيض كنقطة زرقاء محاطة بحلقة حمراء كما في الشكل (6-6) . تدعى هذه الظاهرة بالزيغ اللوني (chromatic aberration) .

يمكن ازالة هذا الزيغ بضم عدسة مقعرة ضعيفة من زجاج الصوان (flint glass) الى العدسة المحدبة الرئيسية (المكونة للصورة) المصنوعة من زجاج التاج (Crown glass) مكونة بذلك مزدوج لا لوني (achromatic couple) .



الشكل (6-6) مخطط للأشعة يوضح الزيغ اللوني.

٥-٦ طرائق زيادة قدرة التمييز:

تعتمد الفتحة العددية ومن ثم قدرة التمييز للعدسة الشيئية على التصميم الهندسي الضوئي للمجهر ($N.A = \mu \sin \theta$). فيكون المتغيران الوحيدان هما دليل الانكسار للوسط المقابل للعدسة الشيئية والطول الموجي للضوء المستخدم. يمكن الحصول على اعظم فتحة عدديه، تحت الظروف المختبرية الاعتيادية، عند غمر العدسة الشيئية بزيت (دليل انكساره " μ " بحدود 1.3) مع استخدام الضوء الأخضر (طوله الموجي حوالي 5000\AA) فيكون حداً لتمييز (δ) المحسوب نظرياً بحدود $0.2\mu\text{m}$ ، لكنه من الناحية التجريبية، يكون هذا الحد مساوياً $1\mu\text{m}$ على وجه التقريب وذلك بسبب العيوب الموجودة في العدسات. لا يمكن استخدام زيت دليل انكساره اكبر من 1.3 وذلك لعدم ملائمة شفافيته الضوئية. ويبقى نتيجة لذلك متغير واحد فقط هو الذي يتحكم بقدرة وحد التمييز وهو الطول الموجي للضوء المستخدم (λ).

يمكن استخدام الضوء فوق البنفسجي (طوله الموجي حوالي 2000\AA) وذلك لتقليل حد التمييز الى حوالي نصف قيمته في حالة استخدام الضوء الأخضر. يعني هذا انه يمكن عند استخدام الاشعة فوق البنفسجية، الوصول الى الغاية الصغرى لحد التمييز عند المقارنة مع قيمته عند استخدام الضوء الأخضر. لكنه مما لا شك فيه ان هناك صعوبات عملية عند استخدام الاشعة فوق البنفسجية في اضاءة العينه، لأن زجاج العدسة الشيئية الاعتيادية يمتص بشدة هذه الاشعة. لذا يجب استخدام عدسة شيئية مصنوعة من الكوارتز (Quartz) او الفلوريت (fluorite).

ومن هنا يتبين ان هناك حاجة ماسة لتقليل حد التمييز وذلك باستخدام اشعة ذات طول موجي قصير جداً. امكن الحصول فيما بعد على هذه الاشعة وهي الاشعة السينية والامواج المصاحبة للإلكترونات المعجلة. أما الاشعة السينية فلا يمكن استخدامها كمصدر اضاءة في المجهر لان العدسات الضوئية (الزجاجية) ليست لها

المقدرة على لم او تجميع هذه الاشعة ومن ثم عدم تكوين الصورة كما أن الالكترونات لايمكن استخدامها لانها لايمكنها اختراق العدسات الزجاجية أولاً ولايمكن للعدسة الزجاجية تجميعها ثانياً.

لقد تم فيما بعد استخدام الالكترونات المعجلة في المجهر الإلكتروني لتكوين صورهِ للجسم المفحوص حيث امكن زيادة قدرة التمييز فيه الى حد كبير جداً وذلك لان الطول الموجي للالكترونات المعجلة صغير جداً ويعتمد على مقدار الفولتية المعجلة كما سنرى في الفصل القادم. فعلى سبيل المثال فإن الطول الموجي للالكترونات المعجلة بفرق جهد مقداره (100000V) هو 0.037\AA فقط مقارنة بالطول الموجي للضوء الاخضر، آنف الذكر، 5000\AA ومن ذلك يمكن تصور مقدار التحسن في قدرة التمييز للمجهر الإلكتروني .

٦-٦ استخدام المرشحات في الفحص والتصوير بالمجهر الضوئي :

قد يكون من المفيد استخدام جزء قليل فقط من طيف الأطوال الموجية الموجودة في الضوء الأبيض، وفي مثل هذه الحالات تستعمل المرشحات (filters) لإزالة الأطوال الموجية غير المطلوبة. وهذا يمكن ان يزيد التباين وتحديد معالم الصورة الضوئية بسبب الانخفاض في الزيج اللوني. فاستعمال المرشح الملائم يمكن ان يحسن قدرة التمييز للعدسة الشيئية ايضاً.

ان المصادر الضوئية المستخدمة في التصوير المجهرية تشع بعضاً من الاشعة تحت الحمراء (infra red) والاشعة فوق البنفسجية (ultra-violet) ايضاً وكل منهما يسبب تأثيرات غير مرغوبة. يمكن ازالة الضوء فوق البنفسجي بامرار حزمة الاضاءة خلال خلية زجاجية فيها محلول مائي كثافة نترات الصوديوم فيه 2% . وتزيل خلية السائل أيضاً الحرارة الناتجة من الاشعة تحت الحمراء، وبهذا يمكن تجنب اي تشويه للصورة قد ينشأ من جراء ذلك.

ولأجل زيادة التباين بين الاجزاء المختلفة في البنية المجهرية، يجب ان يكون لون

زجاج المرشح متمماً للون السائد في البنية المزمع تصويرها. وغالباً ما يستعمل
مرشح اصفر في تصوير بنية النماذج الحديدية.

ولابد من زيادة زمن التعريض عند استعمال المرشحات لأن قسماً من الضوء
يمتص من قبل المرشح نفسه وبذلك تقل شدته.

تمارين الفصل السادس

- ١- عرّف الاصطلاحات التالية: ١- قدرة التمييز . ٢- الزيغ اللوني . ٣- الزيغ الكروي . ٤- حد التمييز .
- ٢- مجهر له طول انبوب مقداره (200mm) . احسب التكبير التقريبي الحاصل عندما يتم استخدام عدسة شبيئية بعدها البؤري (4mm) مع عدسة عينيه ذات تكبير مقداره (8) أضعاف .
- ٣- قارن بين قدرة التمييز للمجهر الضوئي عند استخدام الضوء الأخضر ($\lambda=5000\text{\AA}$) في الاضاءة والمجهر الالكتروني عندما تكون الفولتية المعجلة 100kV ($\lambda=0.037\text{\AA}$) وعند تساوي بقية العوامل .
- ٤- ارسم مخطط لكيفية تكوّن الصورة في المجهر الضوئي المركب مع شرح عمل كل من العدسة الشيئية والعينية .
- ٥- عدد أنواع العيوب في العدسات الضوئية ثم اشرح واحداً منها واذكر كيفية التقليل من تأثيرها .
- ٦- لماذا يكون حد التمييز المحسوب اصغر بكثير من حد التمييز المقاس عملياً؟ اذكر كيف يمكن تقليله عملياً .
- ٧- ماهي الغاية من استخدام المرشحات عند الفحص المجهرى وكيف يمكن التخلص من الاشعة فوق البنفسجية او تحت الحمراء .

الفصل السابع

المجهر الالكتروني

٧-١ الخواص الأساسية للإلكترونات:

من الضروري معرفة بعض الخواص الأساسية للإلكترونات مع ما صاحب ذلك من تطورات في نظرية الإلكترون قبل الدخول الى المجهر الالكتروني. اضافة الى ذلك من الضروري معرفة بعض خواص الإلكترونات الموجوده في الذرات والمواد الصلبة. ويمكن القول ان الإلكترون يمثل الماهية الاكثر أهمية في الكون.

هناك حقيقتان تالازمان الإلكترون هما أولاً انه جسيم (دقيقة) مشحون بشحنة سالبة وله كتلة معينة ثانياً أنه يمتلك طبيعه موجبه وبذلك يشترك بهذه الخاصية مع الضوء والأشعة السينية او اية أشعة كهرومغناطيسية أخرى. ان هذه الخاصية الازدواجية (الدقائقية الموجبة) هي التي جعلت الإلكترون ملائم بصورة خاصة لدراسة بنية وتكوين المادة في جهاز ضوئي الكتروني.

يعالج الميكانيك الكمي (Quantum mechanics) بالأساس فكرة الدقائقية الموجية كما في معادلة شرودنكر (Schrodinger's equation) وفكرة الامواج المادية لدبرولي (de Broglie) وقاعدة عدم التأكد (uncertainty principle) لهايزنبرك (Hei-senberg) ثم الاسهامات المتعلقة بذلك والتي تم تطويرها بعد سنة 1910 .

٧-٢ الطبيعة الموجية للإلكترونات:

لقد تأكدت الطبيعة الموجية للإلكترونات نتيجة لبحوث عدد من العلماء كان آخرهم دبرولي سنة 1924 في اطروحته لنيل شهادة الدكتوراه حيث وضع الفكرة في معادلة مهمة جداً وهي:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{..... (1-7)}$$

حيث تمثل λ الطول الموجي المرافق.

و h ثابت بلانك (Planck's constant) $(6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec})$

و P زخم الجسيم.

أي أن

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

v سرعة الجسيم و m كتلته الحركية .

يمكن كتابة المعادلة (2-7) كالآتي :

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (3-7)$$

باعتبار أنه حسب النظرية النسبية

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad \dots\dots\dots (4-7)$$

تمثل m_0 كتلة السكون للجسيم

و c سرعة الضوء $<< v$ سرعة الجسيم $(c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$ يستنتج من نظرية دبرولي وأبحاث بقية العلماء انه اذا مرّت حزمة من الالكترونات خلال بلورة، فإنها يجب ان تظهر ظاهرتي الحيود والتداخل (interference) مشابهة في ذلك الأشعة السينية. لقد تم الاعلان في سنة 1927 انه تم التأكد تجريبياً على حيود الالكترونات. وبذلك تم التحقق من الخاصية الموجية للإلكترونات إضافة الى الخاصية الكتلية كجسيمات. يمكن كتابة طاقة الالكترونات المعجلة بفرق جهد مقداره V_0 كالآتي وحسب النظرية النسبية ايضاً:

$$eV_0 = mc^2 - m_0c^2 \quad \dots\dots\dots (5-7)$$

تمثل V_0 الفولتية المعجلة بالفولت و

e شحنة الالكترون $(1.6 \times 10^{-19} \text{ coulomb})$ و

m_0 كتلة السكون للإلكترون $(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})$.

يمكن الآن استخراج العلاقة بين الطول الموجي المصاحب للإلكترونات وبين الفولتية المعجلة من المعادلتين (3-7) و (5-7).

$$\frac{h}{\lambda} = \sqrt{2m_0 e V_0 + \frac{e^2 V_0^2}{c^2}} \quad \dots\dots\dots (6-7)$$

وبتعويض قيم الثوابت الموجودة في المعادلة (6-7) يمكن حساب قيمة الطول الموجي المصاحب للإلكترونات (λ_e) بالإنكستروم (\AA).

$$\lambda_e = \frac{12.27}{\sqrt{V_0 (1 + 0.978 \times 10^{-6} V_0)}} \quad \dots\dots\dots (7-7)$$

والمعادلة الأخيرة هي العلاقة المضبوطة لاية سرعة تمتلكها الإلكترونات. ويمكن استخدام العلاقات التقليدية (classic) للطاقة والتي تصلح لحساب الطول الموجي للإلكترونات عند امتلاكها سرعة قليلة نسبياً أي عند فرق جهد كهربائي منخفض حيث يمكن كتابة معادلة الطاقة الحركية كالآتي:

$$eV_0 = \frac{1}{2} m v^2 \quad \dots\dots\dots (8-7)$$

ومن المعادلتين (2-7) و (8-7) وبعد تعويض قيم الثوابت كما في الحالة السابقة ينتج ان λ_e (\AA) هي:

$$\lambda_e = \frac{12.27}{\sqrt{V_0}} \quad \dots\dots\dots (9-7)$$

اما حدود الفولتية المعجلة في هذه الحالة فهي 100kV, أي انه يمكن استعمال هذه العلاقة المبسطة لفولتيات تعجيل اقل من 100kV على وجه التقريب. لأنه سيكون هناك عامل تصحيح مقداره 5% في الطول الموجي عند هذا التعجيل وفي هذه الحالة يفترض استخدام العلاقة (7-7) لحساب الطول الموجي. يبين الجدول (1-7) تأثير زيادة الفولتية المعجلة على الطول الموجي للحزمة الإلكترونية.

جدول (1-7) تغير الطول الموجي للإلكترونات مع الفولتية المعجلة:

V_0 فرق جهد التعجيل (فولت)	λ_e الطول الموجي للحزمة الإلكترونية (Å)
1	12.27
100	1.227
1000	0.3880
10000	0.1227
50000	0.0548
70000	0.0449
80000	0.04338
90000	0.0392
100000	0.0370
150000	0.0296
1000000	0.0087
2000000	0.0050

٣-٧ طرائق انبعاث الإلكترونات:

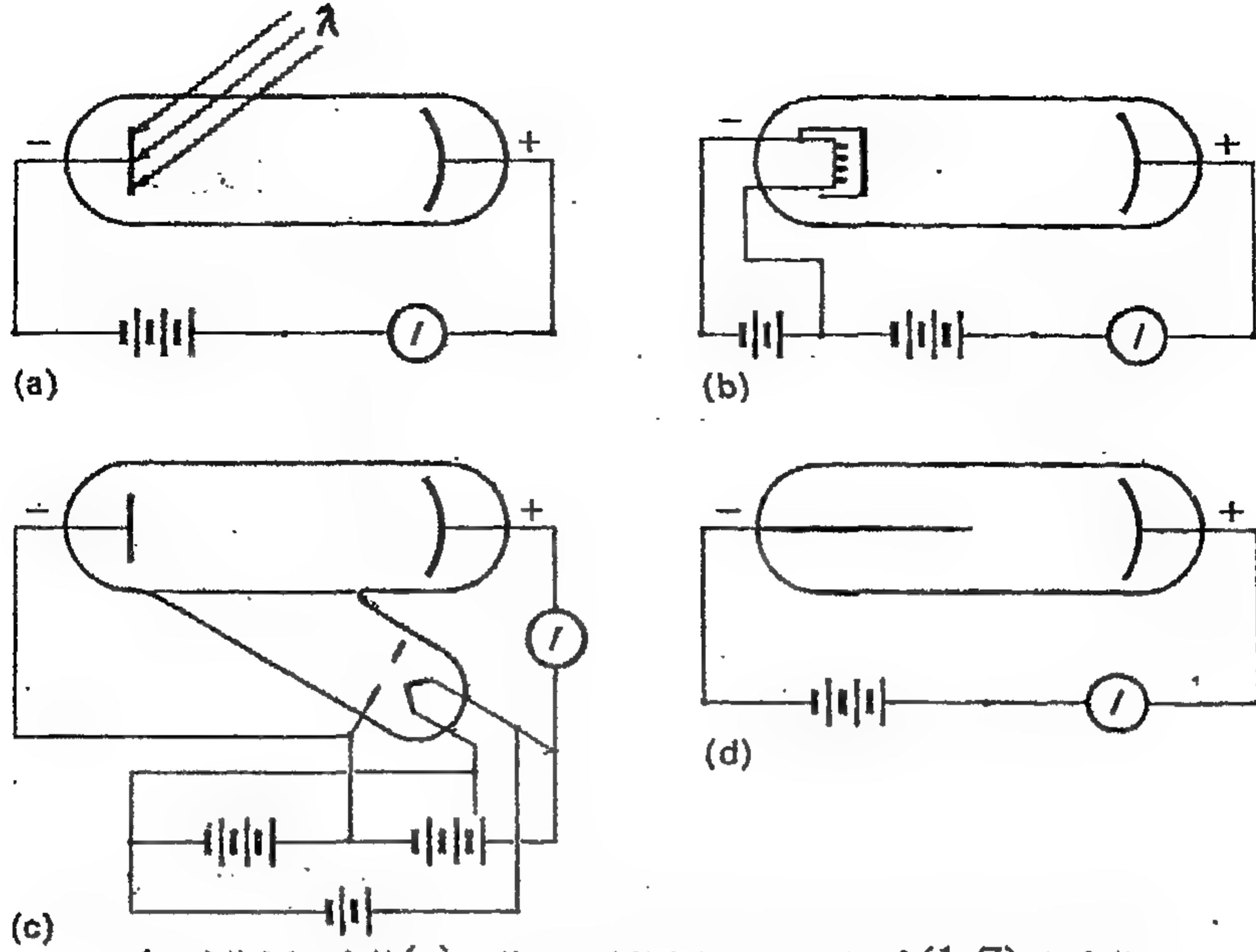
يمكن النظر الى المعدن بأنه أيونات لذرات ذلك المعدن سابحة في بحر من الإلكترونات الحرة او الكثرونات التكافؤ . يوجد حاجز طاقة (energy barrier) في كل معدن يعتمد على دالة الشغل (work function) الخاصة به والجدول (2-7) يتضمن قيم دالة الشغل لبعض المعادن .

جدول (2-7) معدل دالة الشغل لبعض المعادن

رمز المعدن	E_w (eV)	رمز المعدن	E_w (eV)
Ba	2.49	Nb	4.04
Cs	1.81	Pd	5.00
Cr	4.60	Pt	5.35
Co	4.41	Re	5.10
Cu	5.30	Rh	4.58
Hf	3.53	Ag	4.78
α -Fe	4.48	Ta	4.19
Mg	3.60	Th	3.35
Mo	4.25	W	4.50
Ni	4.61	Zr	4.50

وإذا أريد لأحد الإلكترونات الحرة ان يخرج من سطح المعدن فيلزمه الحصول على طاقة تكفي لعبور هذا الحاجز. ان عملية حصول الإلكترونات الحرة في المعدن على طاقة هي التي تؤدي الى انبعاث الإلكترونات.

يبين الشكل (1-7) تخطيطاً للطرائق الأساسية لانبعاث الإلكترونات. يلاحظ ان طاقة الإلكترونات الجسم الصلب تزداد عند تسخينه ، حيث تولد الذبذبات المتزايدة لقلب الايونات زيادة في تصادمات الإلكترونات والتي تؤدي الى زيادة الطاقة الحركية للإلكترونات ويمكن تحقيق ذلك بعدة أساليب أخرى :



الشكل (1-7) أساليب انبعاث الالكترونات (a) الانبعاث الضوئي
(b) الانبعاث الحراري (c) الانبعاث الثانوي (d) انبعاث المجال.

١- بامتصاص الفوتونات الضوئية القريبة من سطح المعدن ذات الطاقة $h\nu$ ثابت بلانك و ν التردد).

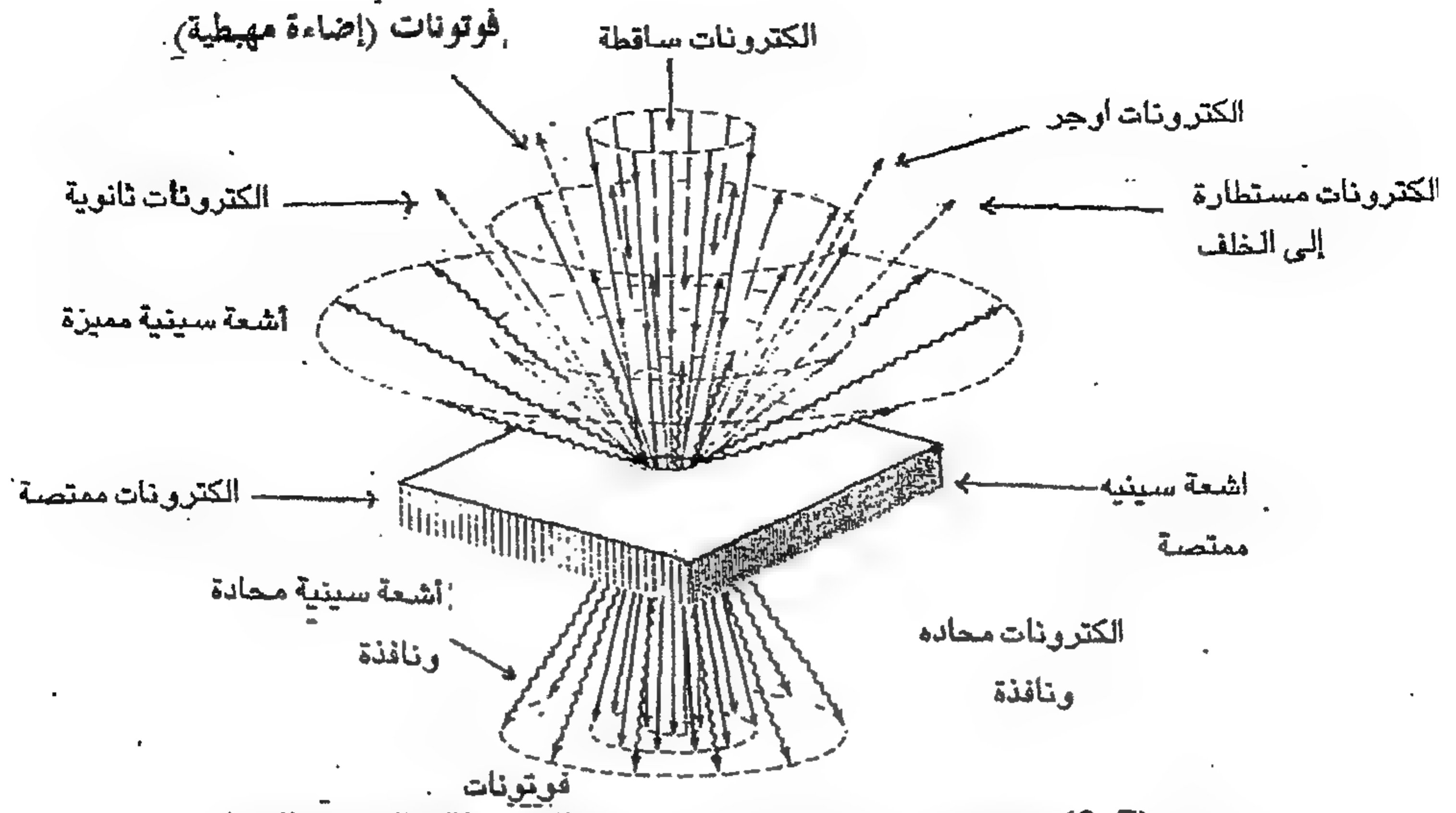
٢- بقصف سطح المعدن بالالكترونات اوليه عالية الطاقة والتي بدورها تعطي طاقة اضافية الى الالكترونات القريبة من السطح حيث تعينها على الهروب منه.

٣- خفض او اخماد ارتفاع حاجز الطاقة بتأثير المجال الكهربائي المستقر (electro static field). يبين الشكل (1-7) بحالاته الاربعه (a و b و c و d) الانبعاث الالكتروني ضوئياً والانبعاث الالكتروني حرارياً ثم الانبعاث الالكتروني الثانوي وأخيراً الانبعاث الالكتروني بالمجال الكهربائي المستقر على التعاقب. يمكن تصور حاجز جهد سطح المعدن كسد يحجز بحر الالكترونات فلاخراج

الاكترونات عبر هذا السد يلزمنا آلية معينة لضخ الالكترونات عبر هذا السد كما في الحالات a و b و c. أما في الحالة d فإن مستوى السد ينخفض بتأثير المجال الكهربائي وبذلك يمكن للإلكترونات ان تشق طريقها عبر السد عند نفس منسوب بحر الالكترونات.

٤-٧ التفاعل بين الحزمة الالكترونية والمادة الصلبة:

تحدث عمليات عدة اذا سقطت حزمة الالكترونية على جسم صلب . ومن هنا برزت عدة تقنيات لدراسة المادة بناء على نوع الظاهرة التي تحدث، يبين الشكل (2-7) أهم نواتج التفاعل بين الالكترونات الساقطة وجسم صلب بلوري. فالأشعة السينية المميزه المنبعثة يمكن ان يتم تحليلها لتزودنا بالتكوين الكيماوي للمنطقة التي انبعثت منها. أما الالكترونات المستطارة عكسياً (back scattered electrons) والإلكترونات الممتصة والالكترونات الثانوية (Secondary electrons) المنبعثة (وهي الالكترونات موجوده أساساً في الجسم الصلب والتي طردت منه نتيجة لاصطدام الالكترونات الاولى به) فيمكن ان ترصد وتستخدم في تحليل تكوين سطح وشحنة وتضاريس (topography) النموذج او الجسم الصلب. يمكن ملاحظة تألق بعض النماذج نتيجة لتولد فوتونات ضوئية في منطقة الاصطدام. يمكن استخدام الالكترونات المحادة في التحليل البلوري والتكوين الكيماوي للجسم كما يمكن استخدامها في الحصول على صورة المجال المظلم للنموذج (dark field image) كما سيأتي ذكره . أما الأشعة السينية المحادة فيمكن استخدامها في معرفة الاطوار الموجودة في منطقة التفاعل . أضف الى ذلك امكانية استخدام الالكترونات النافذة لتكون صورة المجال المضئيء (bright field image) للنموذج ومعرفة بنيته المجهرية الدقيقة.



الشكل (2-7) التفاعل بين الحزمة الالكترونية الساقطة والجسم الصلب.
٧-٥ المجهر الإلكتروني : Electron Microscope

٧-٥-١ المقدمة:

كان الإنسان ولا يزال شديد التطلع الى معرفة دقائق الاشياء فولدت رغبته هذه في الغوص في اعماق الكون الى مكتشفات علمية هامة أثمرت عن بناء الاقمار الاصطناعية ومركبات الفضاء الاخرى، كما أثمرت محاولاته للتعرف على ماهية المادة ومكوناتها الدقيقة عن بناء المجاهر الضوئية والالكترونية نظراً لما تتمتع به الاخيرة من قدرة تمييز عالية جداً مقارنة بالمجاهر الضوئية. سمي المجهر الالكتروني بهذا الاسم لانه يتم استخدام حزمة الكترونية فيه لتكوين صورة للنموذج . تعددت انواع المجاهر الالكترونية بتعدد الاهداف المطلوب دراستها. فتم تصنيع المجهر الالكتروني النافذ (TEM (Transmission Electron Microscope والمجهر الالكتروني الماسح (SEM (Scanning Electron Microscope و المحلل الإلكتروني الدقيق (EPMA (Electron probe Microanalyser وغيرها من أنواع المجاهر الالكترونية الاخرى.

٢-٥-٧ العدسات الالكترونية Electron Lenses

ان الغاية من استعمال نظام العدسات هي جعل قطر حزمة الالكترونات اصغر ما يمكن اي بعبارة أخرى لتكوين صورة مصغرة جداً للمهبط (cathode).

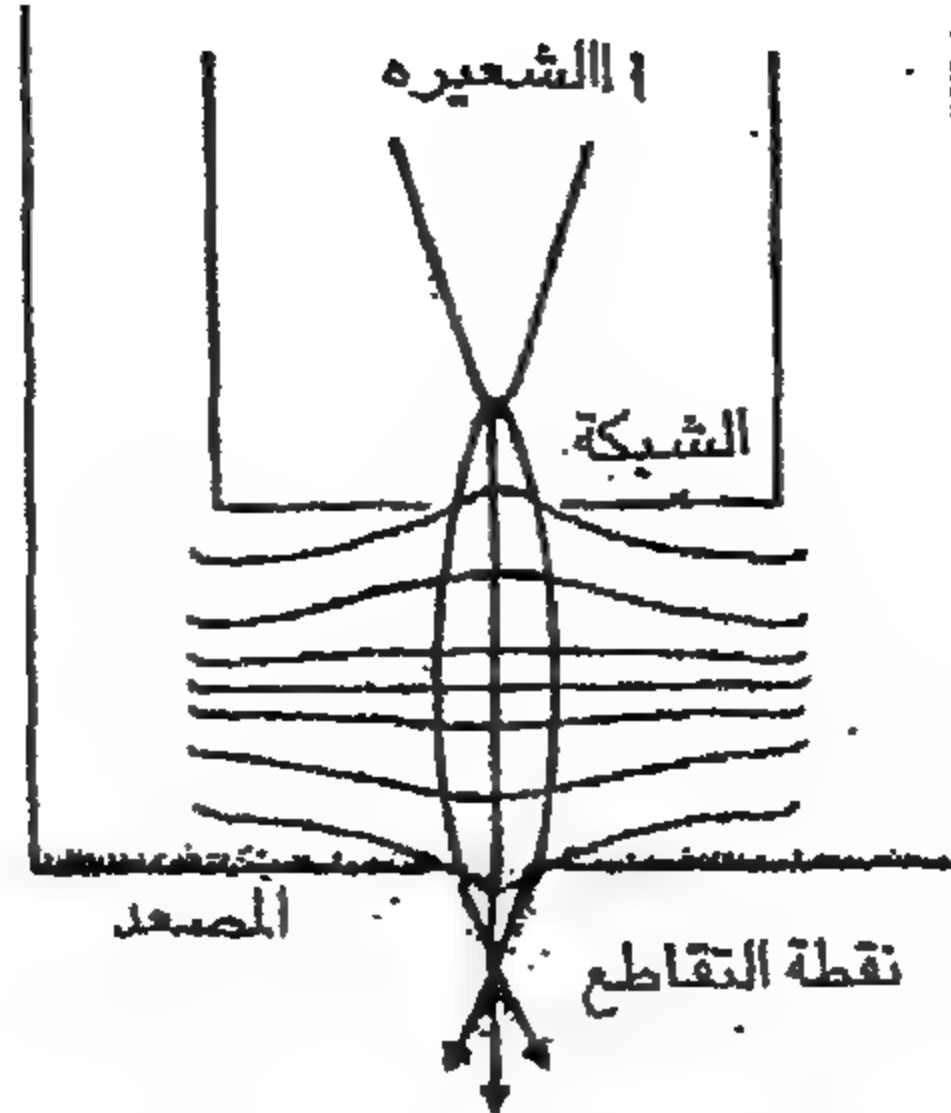
فمن الممكن استخدام عدسات الكهربائية المستقرة (Static Electrical Lens)، كما في حالة قاذف الالكترونات تتألف هذه العدسات في الأساس من مجموعة صفائح تحتوي على ثقوب ليتمكن ان تمر من خلالها الالكترونات. تتم المحافظة على فرق جهد ثابت بين كل صفيحتين والتي تمثل عدسة كهربائية مستقر، الشكل (3-7). يعمل انحناء المجال الكهربائي على تبئير الحزمة الالكترونية. يكون استخدام مثل هذه العدسات شاق او فيه شيء من الصعوبة نظراً لأنها تتطلب عزلاً كهربائياً جيد ضد الجهد الكهربائي العالي المطلوب. تعاني مثل هذه العدسات من زيغ كبير ايضاً، ولذا تستخدم العدسات الكهرومغناطيسية (electro magnetic lens) في المجاهر الحديثة في كل المراحل التي تلي مرحلة القاذف الالكتروني.

يمكن التعبير عن القوة التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على جسيم مشحون يسير خلاله بالمعادلة الاتجاهية الآتية:

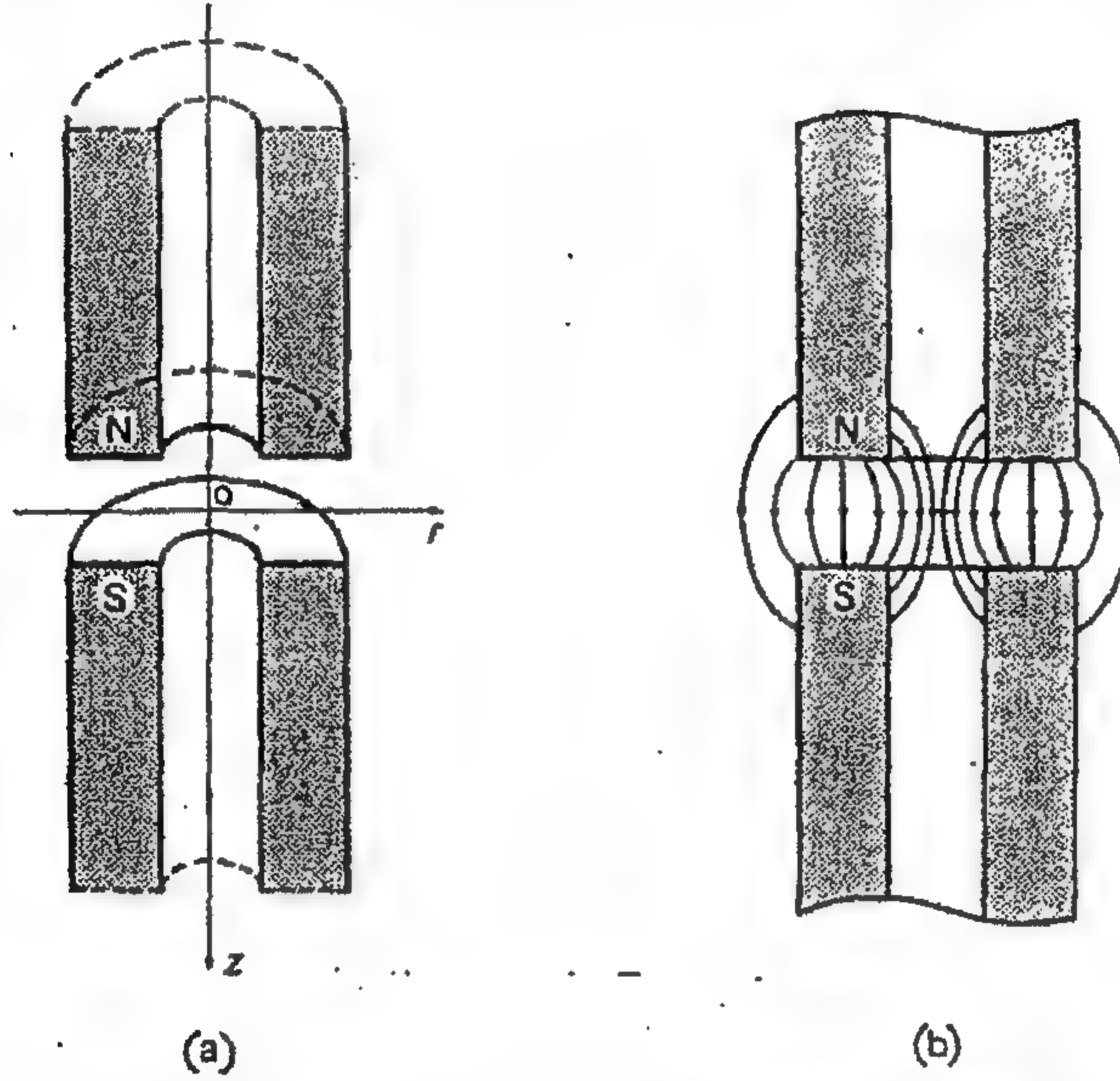
$$F = qv \times B \quad \text{..... (10-7)}$$

حيث تمثل F القوة و q شحنة الجسيم المتحرك و v سرعته و B الحث المغناطيسي.

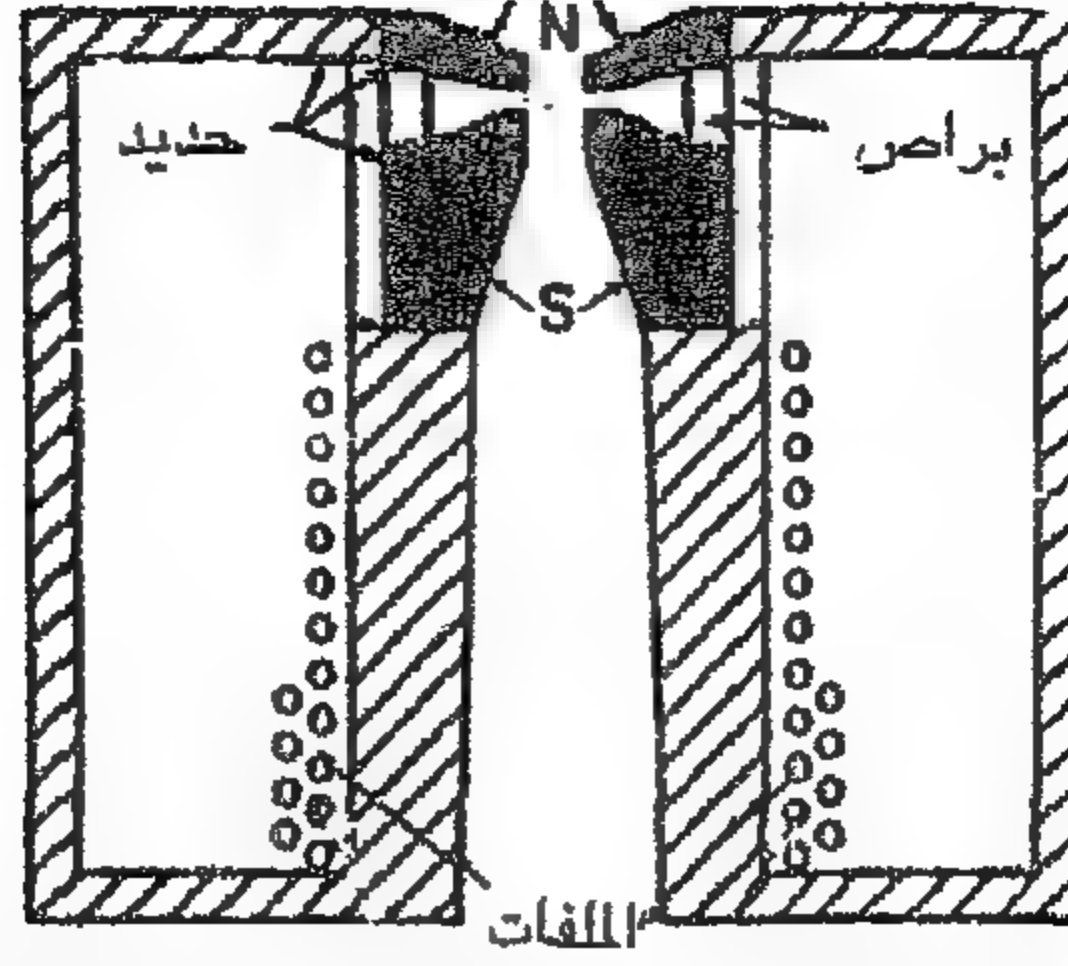
يكون اتجاه القوة اذن عمودياً على متجهي كل من الحث المغناطيسي وسرعة الجسيم المشحون، فيجب في العدسة استخدام مجالات مغناطيسية لها مركبات عمودية على اتجاه سرعة الجسيم. أضف الى ذلك يجب ان يكون المجال المستخدم في العدسة متناظراً محورياً. يفي اي ملف بسيط يمر به تيار بهذه الشروط حيث يستخدم هذا النوع من العدسات في أنابيب أشعة المهبط (Cathode ray tube).



الشكل (3-7) مخطط لمجموعة القاذف الالكتروني وفيها ترى عدسة كهربائية المستقرة التي تلم الحزمة الالكترونية وتظهر كذلك خطوط الجهد المتساوي.



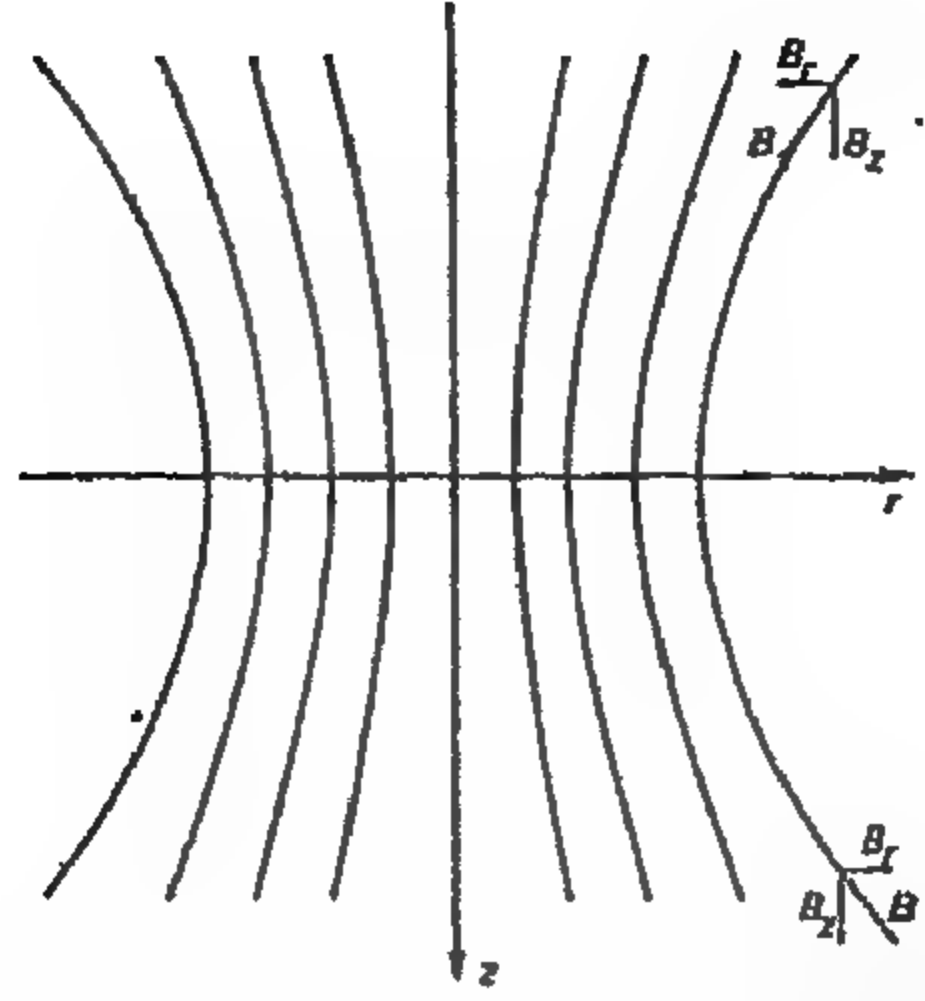
الشكل (4-7) أساس العدسة المغناطيسية (a) زوج الأقطاب المغناطيسية الاسطوانية (b) مقطع عرضي يبين خطوط المجال المغناطيسي بالقرب من الفجوة الفاصلة، ولا يمثل الزيغ مشكلة كبيرة هنا. ان عدسة المجهر الالكتروني بالأساس هي زوج من أقطاب مغناطيسية اسطوانية تجويفها ذو مقطع دائري منتظم، الشكل (4-7)، تُستكمل الدائرة المغناطيسية وتزود العدسة بالطاقة بواسطة ملف، يحمل تياراً يتراوح مقداره بين 50mA الى 1 Amp، الشكل (5-7).



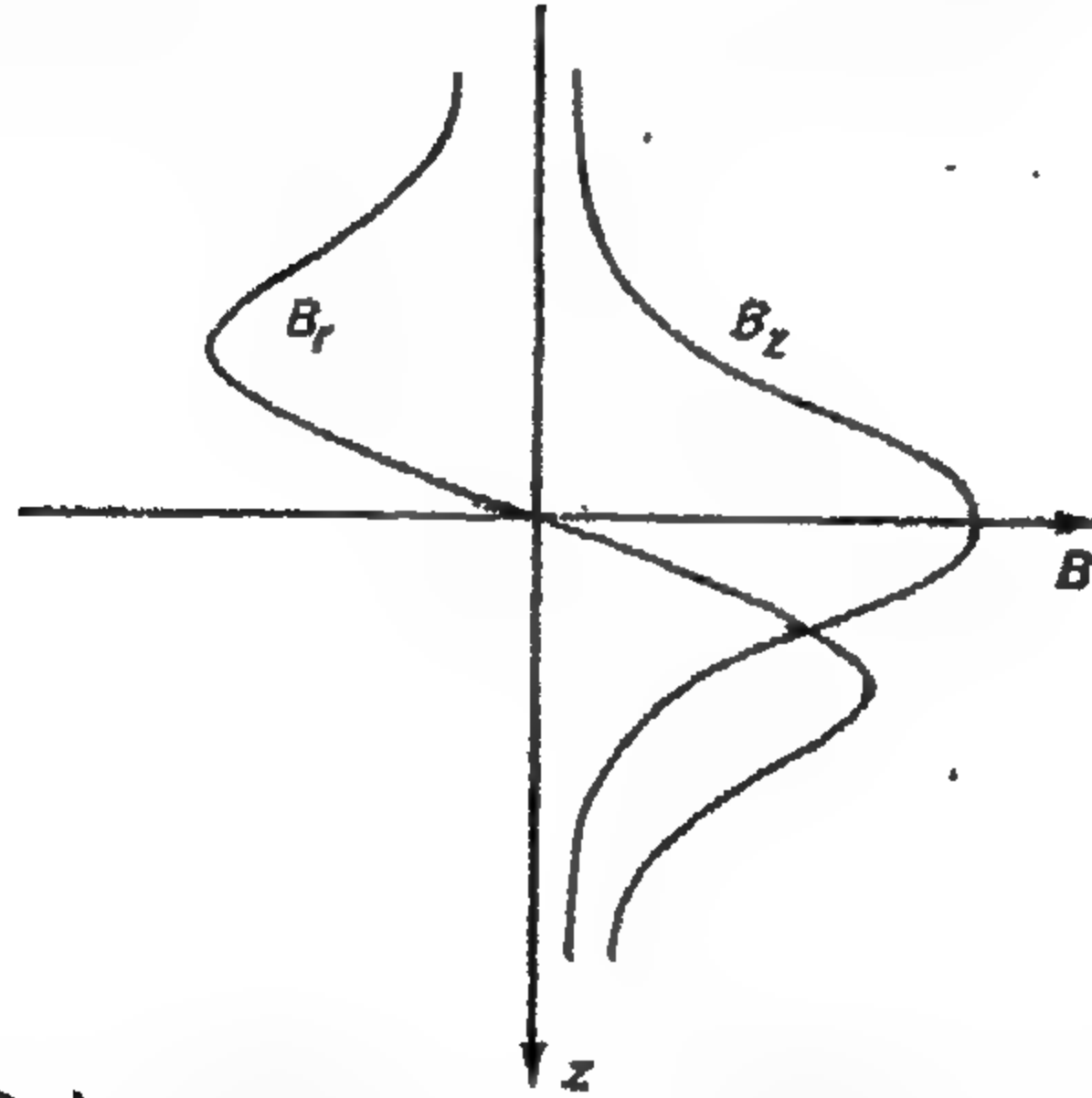
الشكل (5-7) مقطع عرضي لعدسة مغناطيسية نموذجية تستخدم قطعة القطب (المبينة بالأسود) لتركيز المجال المغناطيسي ومن ثم جعل البعد البؤري للعدسة أقصر.

يمكن تمثيل المتجه B بمركبتين هما B_z باتجاه محور العدسة و B_r باتجاه نصف القطر (الشكل 6-7). يمكن الآن تصور مسارات الإلكترونات التي تدخل العدسة. سوف لا يتأثر الإلكترون المار تماماً في محور العدسة بالمجال المغناطيسي لأن الأخير مواز تماماً لاتجاه سرعة الإلكترون (أي أن $B_r = 0$ صفراً). أما الإلكترون المار موازياً لمحور العدسة لكنه ليس في المحور تماماً فسوف لا يتأثر ابتداءً بمركبة المجال B_z ، لكنه سوف يتفاعل مع المركبة النصف قطرية B_r ليؤدي ذلك إلى حركة لولبية حول محور العدسة. وحالما تبدأ الحركة اللولبية هذه يكون لسرعة الإلكترون مركبة سرعة v_t عمودية على B_z وأن المتجه $v \times B$ يمتلك الآن المركبة $v_t B_z$ متجهة نحو محور العدسة وبذا تتحقق عملية التبئير. وأخيراً يغير B_r اتجاهه (شكل 7-7) لكنه لا يتأثر الفعل التبئيري بذلك إلا أن العزم الزاوي الذي يمتلكه الإلكترون عند دخوله العدسة يضمن ويتوقف التدوير. يبين الشكل (8-7) مسار الإلكترون عند دخوله المجال المغناطيسي للعدسة.

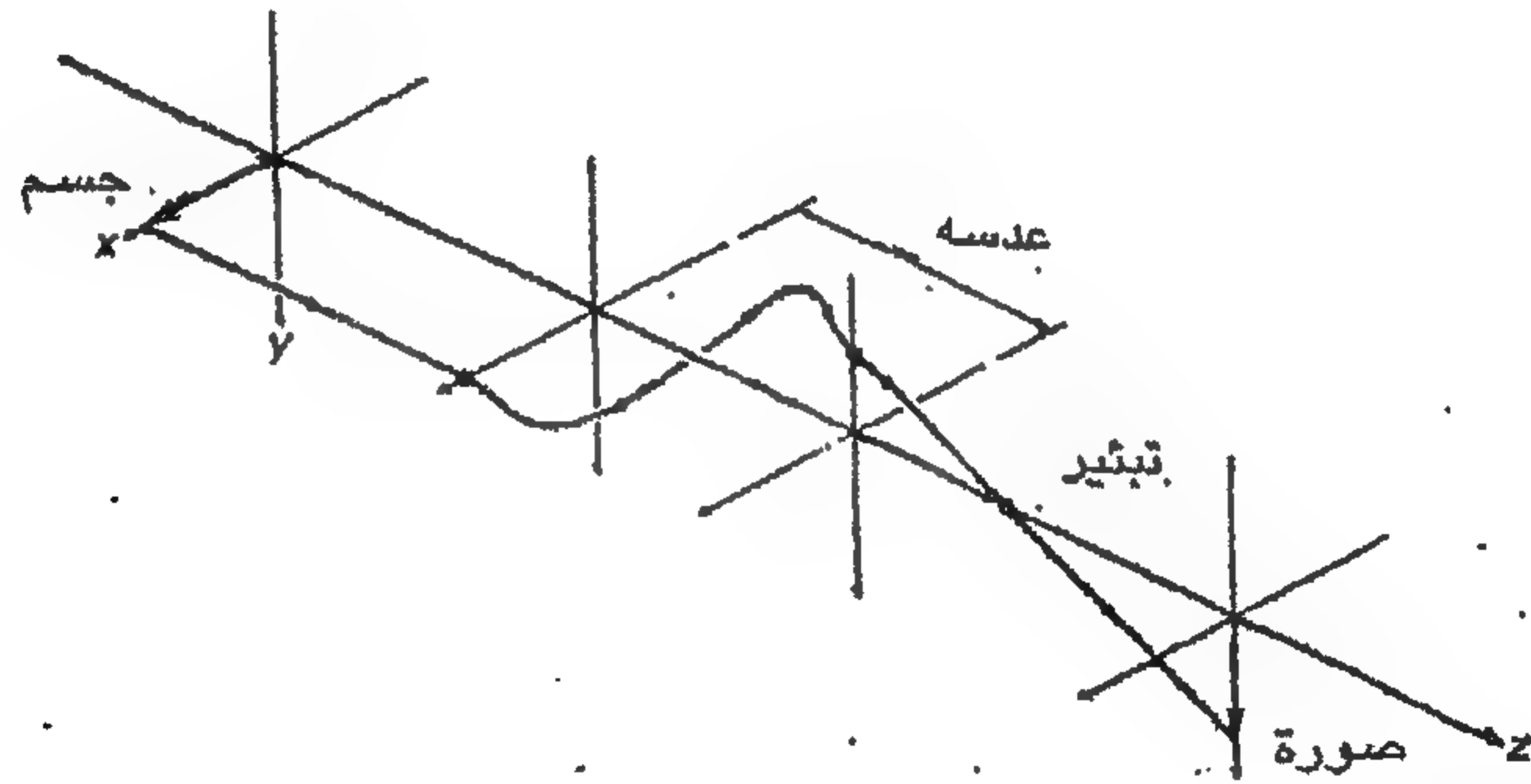
يكون مجمل تأثير مجال العدسة على الحزمة الإلكترونية ثنائياً حيث أن الحزمة تستدير كلياً وكنتيجة لهذا الدوران تتبئر. ينتج شيء آخر عن الدوران وهو أن أية صورة تكونها العدسة تكون مداره بالنسبة للجسم بزاوية معينة تعتمد قيمتها على شدة مجال العدسة (في حين أن زاوية الدوران في العدسات الضوئية بالمقارنة ثابتة وتساوي 180°). وهذا شيء يجب ادخاله بالإعتبار عند المقارنة بين الصور ذات التكبير المختلف (تكون العدسة ذات شدة مجال مغناطيسي مختلف عند كل تكبير) وخاصة في المجهر الإلكتروني النافذ (TEM).



الشكل (6-7) خطوط المجال المغناطيسي بالقرب من محور العدسة.



الشكل (7-7) المركبتان المحورية والقطرية للحث المغناطيسي (B_r , B_z) بالقرب من محور العدسة.



الشكل (8-7) مسار الإلكترون خلال العدسة المغناطيسية فالإلكترون يتحرك لولبياً حول محور العدسة ليتبئر عنده.

يمكن اشتقاق معادلات للبعد البؤري للعدسة المغناطيسية (f) بدلالة Bz فقط بالرغم من ان المركبة Br أساسية في مجال العدسة.

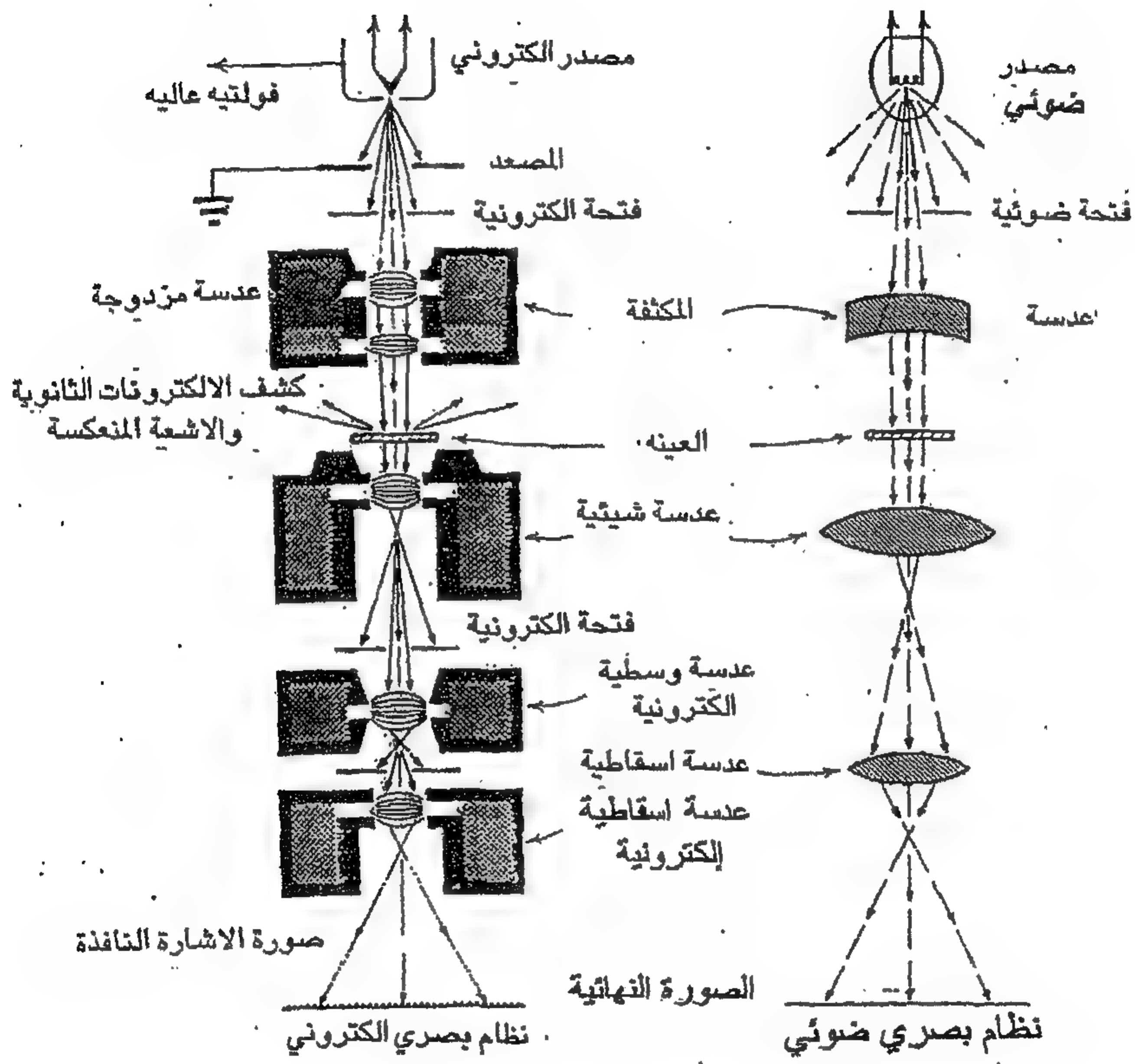
$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8mV_0} \int_{\text{lens}} B_z^2 dZ \quad \dots\dots\dots(11-7)$$

ان العلاقة (11-7) هي معادلة تقريبية للعدسات المغناطيسية الرقيقة حيث تمثل m كتلة الإلكترون و V_0 الفولتية المعجلة للإلكترونات. ومع ان العدسات الحقيقية قد تكون سميكة بالنسبة لتطبيق هذه المعادلة لكنها توضح بعض النقاط العامة التي تصلح لكل العدسات المغناطيسية وهي:

- ١- ان البعد البؤري يعتمد على نسبة $\left(\frac{e}{m} \right)$ للجسيم (الإلكترون) وهذا يغير تصرف عدسات كهربائية المستقرة.
- ٢- تؤثر الفولتية المعجلة على البعد البؤري من خلال تأثيرها على سرعة الإلكترونات وقد سبقت الإشارة الى ذلك فالإلكترونات الأبطأ تنحرف بسهولة والعكس صحيح. لذلك فالاستقرار العالي في الفولتية المعجلة (بحدود جزء لكل 10^5 من الأجزاء) شيء أساسي لتقليل الزيغ اللوني.
- ٣- يكون البعد البؤري موجباً مهما كانت إشارة الحث المغناطيسي للعدسة.
- ٤- يكون البعد البؤري أقصر عند الحث المغناطيسي (Bz) الاعلى. إذن يمكن تغيير البعد البؤري للعدسة الكهرومغناطيسية بتغيير التيار المار بها (المار بالملف). وهذا شيء ملائم جداً عند تبئير الصور وفي حالة المجهر الإلكتروني النافذ (TEM) عند تغيير التكبير ايضاً، تختلف الحال في المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) وذلك لعدم وجود عدسه لتكوين الصورة اي عدم وجود العدسة الشيئية وانما يتم بناء الصورة شيئاً فشيئاً بما يتشابه وجهاز التلفاز (Tele-vision). وللحصول على قدرة تمييز اعلى يجب ان يكون التيار المار بالعدسة اكثر استقراراً اي بحوالي جزء واحد لكل 10^6 من الأجزاء.

٧-٥-٣ تصميم المجهر الإلكتروني النافذ:

بما أن عمل العدسة الكهرومغناطيسية مشابه لعمل عدسة الضوء الزجاجية، فإن التصميم الأساس للمجهر الإلكتروني، كنتيجة لذلك، مشابه للمجهر الضوئي كما مبين في الشكل (9-7) التخطيطي حيث يتشابه ترتيب العدسات ومسار الأشعة في كليهما.



الشكل (9-7) مقارنة تخطيطية بين نظامي المجهر الضوئي النافذ

والمجهر الإلكتروني النافذ.

يتألف المجهر الإلكتروني النافذ بصورة مبسطة من الأجزاء الرئيسية التالية:

- ١- مصدر (قاذف) الإلكترونات.
- ٢- عدسات مكثفة.
- ٣- عدسة شبيئية وعدسات مكبرة أخرى (العدسة الوسطية والعدسة الاسقاطية).
- ٤- شاشة لظهار الصورة عليها.
- ٥- كاميرا لتسجيل الصورة.
- ٦- مصدر قدرة للتجهيز بالفولتية المعجلة وما تتطلبه الدوائر الكهربائية الأخرى.

أ- مصدر الإلكترونات او قاذف الإلكترونات:

وقد يتغير تصميم قاذف الإلكترونات (electron gun) بشكل أو آخر في المجاهر المألوفة ، لكنه يتألف في أغلب الأحيان، من شعيره (filament) تنكستن قطرها تقريباً 0.1 mm . يكون شكل شعيرة التنكستن على شكل حرف (V) يبعث او يطلق الإلكترونات من الجزء المدبب الموجه نحو الأسفل اي باتجاه عمود المجهر. يعطي هذا التصميم اعظم انبعاث للإلكترونات مركزه من مساحة صغيرة جداً اي ان الإلكترونات مركزة في حزمة الكترونية اوليه ضيقة. تُجعل الشعيرة كمهبط ذو جهد سالب نسبة الى المصعد المربوط بالأرضي (earth) . تنبعث الإلكترونات من الطرف المدبب للشعيره بواسطة الانبعاث الحراري (thermoionic emission) الذي مرّ ذكره سابقاً.

ان خواص الانبعاث الحراري للإلكترونات هي التي جعلته اكثر ملائمة للأجهزة الإلكترونية الضوئية. فالإلكترونات المنبعثة حرارياً تمتلك تجانساً أكثر من حيث السرعة في الحزمة الإلكترونية الأولية مما يقلل التشويش الحاصل في صورته النهائية.

يبين الشكل (3-7) تخطيطاً لتصميم قاذف الكتروني حيث يتغير موقع وشكل غطاء الشبكة والمصعد اعتماداً على التطبيقات المعينه. تكون الشعيره ذات فولتية اقل سالبيه من غطاء الشبكة (grid) بحوالي 100 الى 1000 فولت أما المصعد (anode) فهو مأرض (متصل بالأرضي) اي عند جهد ارضي (ground potential). وهذا الترتيب يحسن استقرارية تيار الانبعاث ويساعد في تركيز حزمة الالكترونات. تعمل منظومة قاذف الالكترونات عمل عدسة الكهربائية المستقرة ايضاً كما مرّ ذكره.

ب- العدسة المكثفة:

تعمل العدسة المكثفة على تنظيم شدة حزمة الالكترونات في المجهر. كما أنها تجمع (تلم) الحزمة الالكترونية عند وصولها الى النموذج المراد فحصه. تتكون العدسة المكثفة من عدسة مزدوجة عادةً. ان جميع الحزمة الالكترونية بفعل هذه العدسة مع استخدام فتحات صغيرة لمرور الالكترونات في هذه المرحلة كل ذلك يؤدي الى تباين (contrast) صوري جيد للنموذج في المجهر الإلكتروني النافذ. يتم تعزيز تأثير العدسة في المكثف ومايتبعه من عدسات (الشكل 7-9) بتركيز خطوط المجال بوساطة فتحة قطب العدسة الممغنطة بشدة والتي لها ترتيب معين و أقطار محدد. يمكن التعبير عن البعد البؤري للعدسة المكثفة (f_c) بالآتي:

$$f_c = \frac{\zeta_c V_o}{N_c^2 I_c^2} \quad \text{..... (12-7)}$$

حيث تمثل ζ_c العامل الهندسي التصميمي للعدسة المكثفة.

N_c عدد لفات السلك النحاسي في ملف المكثف .

V_o جهد تعجيل حزمة الالكترونات بالفولت.

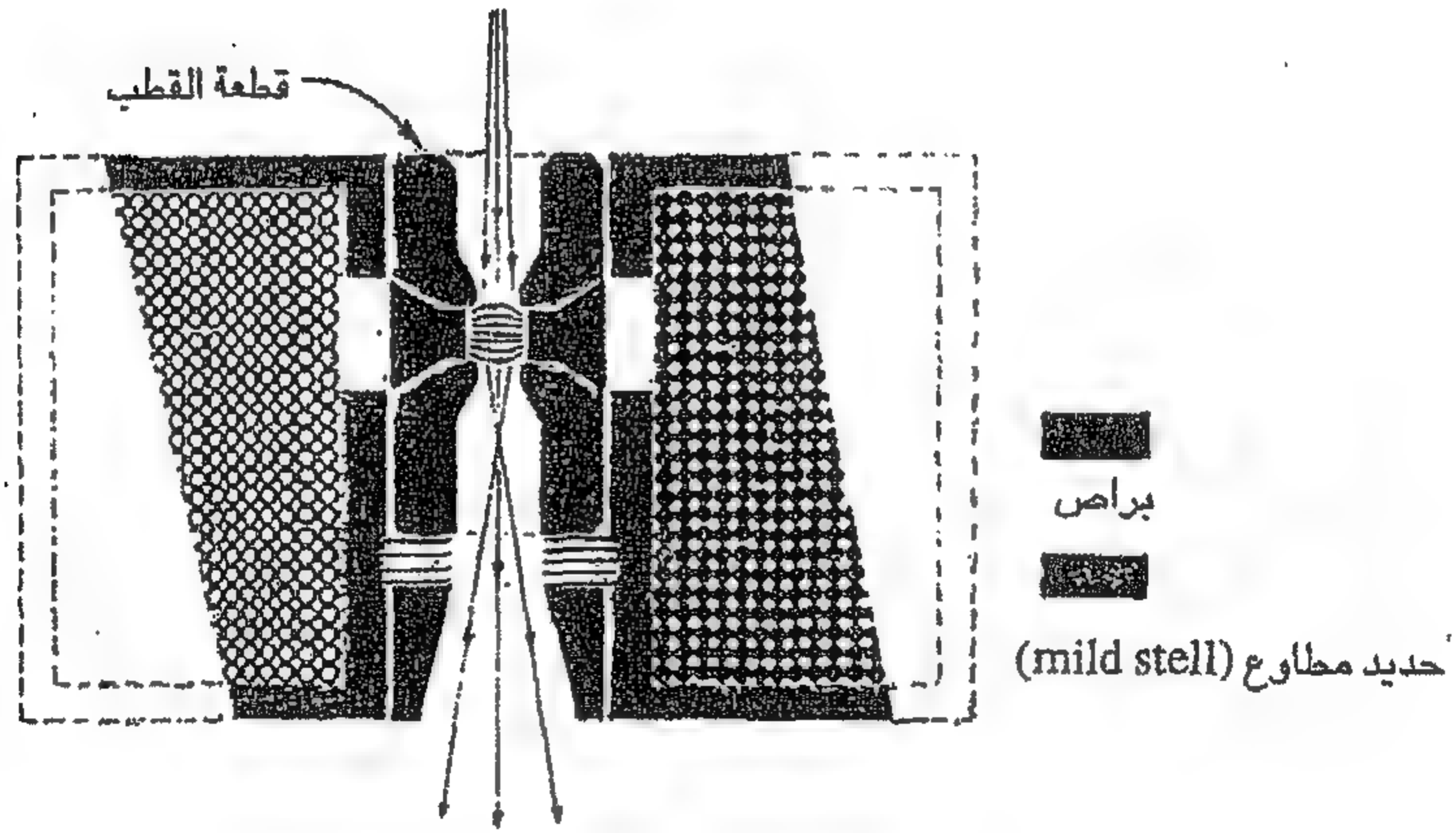
I_c التيار المار بملف المكثف بالأمبير.

ومنها يتضح ان زيادة التيار المار تقلل البعد البؤري للعدسة وبذلك يمكن تبئير الحزمة الالكترونية على النموذج.

ج- العدسة الشيئية Objective lens :

تقوم العدسة الشيئية في المجهر الالكتروني النافذ، على سبيل المثال، بنفس وظيفة العدسة الشيئية الزجاجية وهي بالتحديد تبئير معالم النموذج. اي ان العدسة الشيئية تكوّن اول صورته مكبرة للجسم وتبين معالمه. تختلف العدسة الالكترونية الشيئية عن العدسات المكثفة السابقة او العدستين الإسقاطية (projection lens) او الوسطية (Intermediate lens) في انها ذات اداء عالي اي في امكانية تصغير بعدها البؤري الى مدى بحدود (1mm) ويكون تصنيع فتحة أقطابها دقيقاً جداً وذات ابعاد مضبوطة الى حد كبير.

يبين الشكل (10-7) تصميم هيئة العدسة الشيئية تخطيطياً.



الشكل (10-7) تصميم لعدسة شيئية (بصورة تخطيطية).

يتم حساب البعد البؤري للعدسة الشيئية باستخدام نفس معادلة (7-12) مع مراعاة قيمة التيار المار في العدسة الشيئية وعدد لفات ملفها وعاملها الهندسي. يكون التيار المار في الشيئية عالي نسبياً ولذلك تتطلب العدسات الكهرومغناطيسية، وخصوصاً الشيئية منها، تبريداً مستمراً نتيجة للحرارة المتولدة عن مرور التيار الكهربائي.

د- العدسات الوسطية والاسقاطية: Intermediat and projection Lenses

ان وظيفة العدسة الوسطية في اغلب المجاهر الالكترونية هي السيطرة على قوة التكبير (magnification) حيث يتم التحكم في تكبير الصورة النهائية عادةً بالتحكم في تيار العدسة الوسطية، ومن الجدير بالذكر، فإن مقدار تكبير الصورة النهائية يعين بحاصل ضرب تكبير العدسات الشيئية والوسطية والاسقاطية اي أن:

$$M = M_o M_I M_p \quad \dots\dots\dots(7-13)$$

حيث تمثل M مقدار التكبير النهائي للصورة.

و M_o مقدار تكبير العدسة الشيئية.

و M_I مقدار تكبير العدسة الوسطية.

و M_p مقدار تكبير العدسة الإسقاطية.

٤-٥-٧ الزيغ في العدسات المغناطيسية:

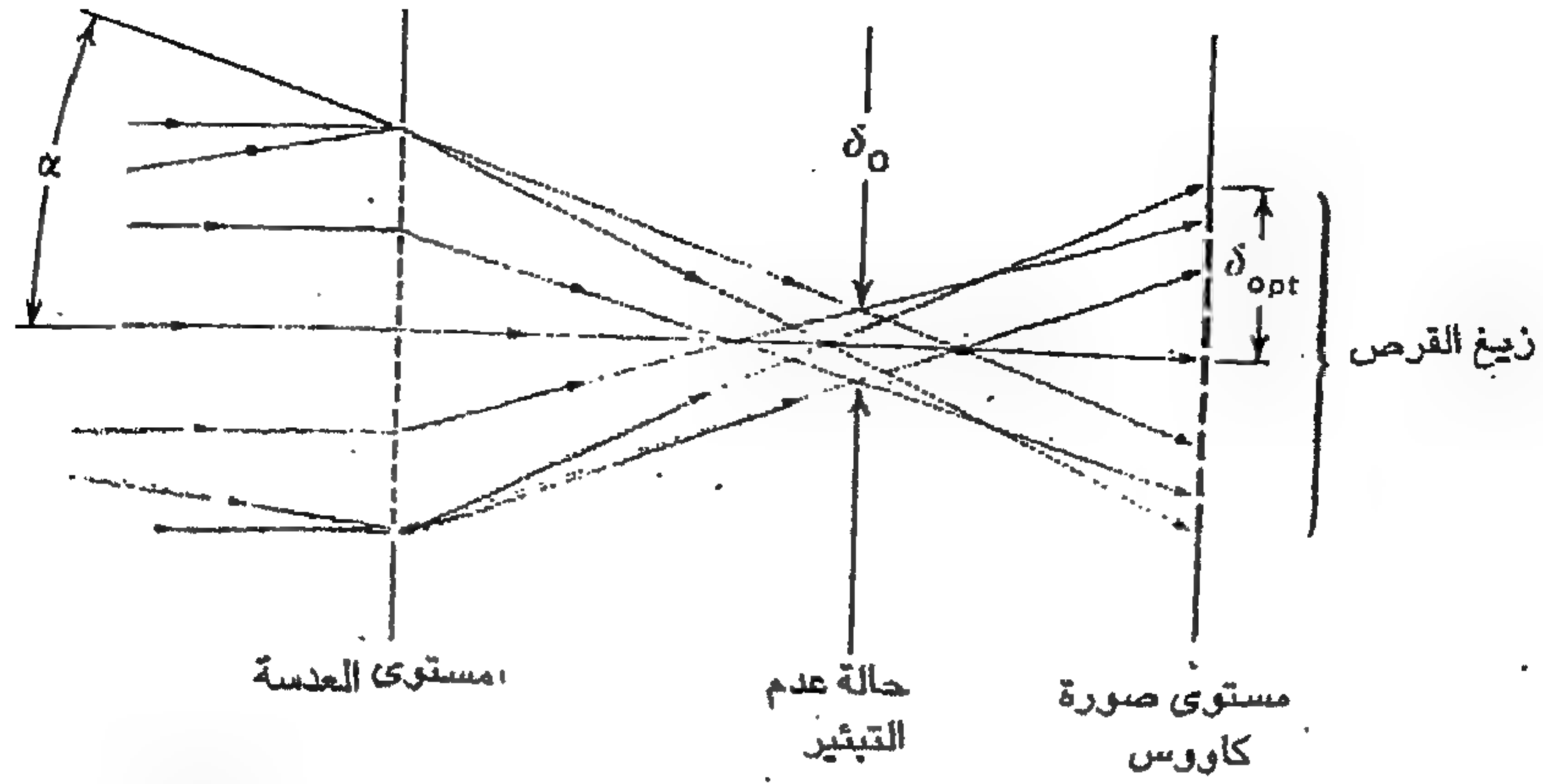
انه لشيء مفاجئ حقاً ان تكون عيوب العدسات المغناطيسية مشابه تماماً لعيوب العدسات الضوئية بالرغم من اختلاف طبيعة الاشعة المستخدمة والعدسات وتصميمها وكيفية عمل كل منها. سنقتصر بالحديث هنا عن اهم هذه العيوب وأسبابها وكيفية التخلص منها.

أ- اللابؤرية:

تحصل هذه الظاهرة عندما يوجد بعد بؤري أكبر (باتجاه معين وعند مستوى ما) من البعد البؤري الآخر بالاتجاه العمودي على الاتجاه الأول وفي نفس المستوى. ان سبب ظهور هذا العيب هو عدم كون مقطع فتحة قطب العدسة دائرة مضبوطة تماماً. او قد يكون السبب استخدام فتحة غير دائرية بالضبط لتحديد قطر الحزمة الالكترونية مما يسبب تشويهاً بيضوياً في مستوى الصورة عند تبثير الحزمة الالكترونية يمكن ازالة اللابؤرية بادخال المبثرات (stigmators) في المناطق المناسبة من نظام عدسات المجهر وذلك لتعديل وتلافي عدم الاستدارة في شكل صورة الحزمة في مستوى الصورة. يتكون المبثر من أجزاء (ملفات صغيرة) مولدة للمجال المغناطيسي تعمل على ازالة الشكل البيضوي لصورة الحزمة و تغييره او تعديله الى شكل دائري منتظم.

ب- الزيغ الكروي:

تتبثر الإلكترونات القادمة من مناطق مختلفة من الجسم نسبة الى المحور الضوئي تماماً قبل مستوى العدسة عند نقاط تختلف قليلاً بالبعد عن بعضها وذلك بسبب طبيعة هندسة المجال المغناطيسي للعدسة الالكترونية. تؤدي هذه الظاهرة الى تقليل حدة الصورة على المحور الالكتروني الضوئي (الشكل 7-11) وتعتمد بدرجة كبيرة على زاوية الفتحة α . يدعى هذا الزيغ احياناً بعيب الفتحة. يعتبر الزيغ الكروي من أهم عيوب العدسات لأنه العيب الذي يحد من قدرة تمييز الاجهزة الالكترونية الضوئية مثل المجهر الالكتروني النافذ والمحلل الالكتروني الدقيق وغيرها.



الشكل (7-11) قرص الزيغ وقرص التشويه الأقل (δ_0) في حالة الالكترونات.

بما أن العدسة التي تكون الصورة في المجهر الالكتروني هي العدسة الشيئية فسيكون التركيز في الكلام حول الزيغ في هذه العدسة. يمكن وصف قطر التشويه δ_{sp} الناتج من الزيغ الكروي بالآتي:

$$\delta_{sp} = 2Cs \alpha^3 \quad \dots\dots\dots (14-7)$$

حيث يمثل C_s معامل الزيغ الكروي والذي يعطى بالعلاقة

$$C_s = \frac{1}{2} \left(\frac{V_0}{N^2 I^2} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (15-7)$$

لقد لوحظ ان الزيغ الكروي يتناسب مع مربع البعد البؤري للشيئية المعطى

بالمعادلة (7-12) وفتحة العدسة α . لذا يمكن كتابة المعادلة (7-15) كالآتي:

$$C_s = \frac{\delta_0 f_0 V_0}{(NI)^2} \quad \dots\dots\dots (16-7)$$

δ_0 ثابت تتراوح قيمته بين 100 للعدسات القوية و 150 للعدسات الضعيفة. اذن

يعتمد الزيغ الكروي على التغيير في البعد البؤري مع الفولتية كما يعتمد بشده على فتحة العدسة α . يكمن تصحيح الزيغ الكروي في تصميم عدسات يكون توزيع مجالاتها المغناطيسية بشكل خاص بحيث يحقق زوايا فتحة صغيرة مع انخفاض

آني في قيمة (C_s) . كما ان استخدام الفتحة (aperture) يخفض الزيغ بصورة ملحوظة ومن ثم يزيد من حدة الصورة.

ج- الزيغ اللوني:

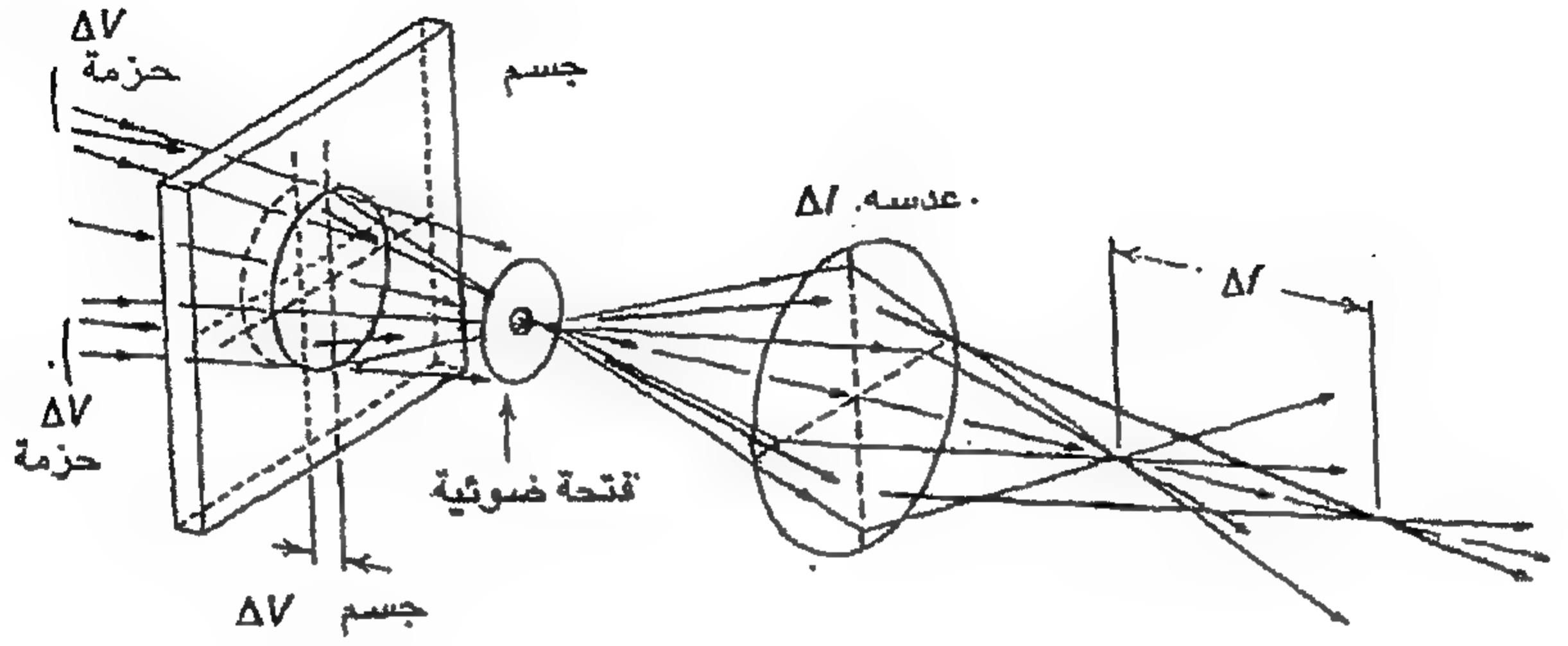
ان بعض العيوب ومنها العيبين المذكورين للتو (اللابؤرية والزيغ الكروي) تتولد بسبب خواص العدسة الالكترونية نفسها، مع العلم ان هناك عيوب أخرى ناشئة بسبب خواص الحزمة الالكترونية نفسها. وبقدر ما يتعلق الامر بالعدسة الشيئية فإن الزيغ اللوني يظهر كإنخفاض او نقصان في تباين الصورة وهو ناتج من الاختلاف في سرعة الكترونات الحزمة الإلكترونية نفسها والذي يصاحبه تغيير في البعد البؤري نتيجة لعدم استقرارية التيار المار في ملفات العدسة. يبين الشكل (12-7) المعنى الفيزيائي لهذا الزيغ تخطيطياً. يلاحظ هنا أنه عند التغييرات الكبيرة في البعد البؤري للشيئية (f_0) على سبيل المثال، فإن مكان الصورة يتصف بتغيير في قطره واستدارته وتكبيره. يعتمد الزيغ اللوني على فقدان في طاقة الإلكترون ΔV والتغيير في تيار العدسة ΔI ويمكن التعبير عنه بالآتي:

$$\delta_{cr} = 2 C_c \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta I}{I}\right)^2} \quad \dots\dots\dots(17-7)$$

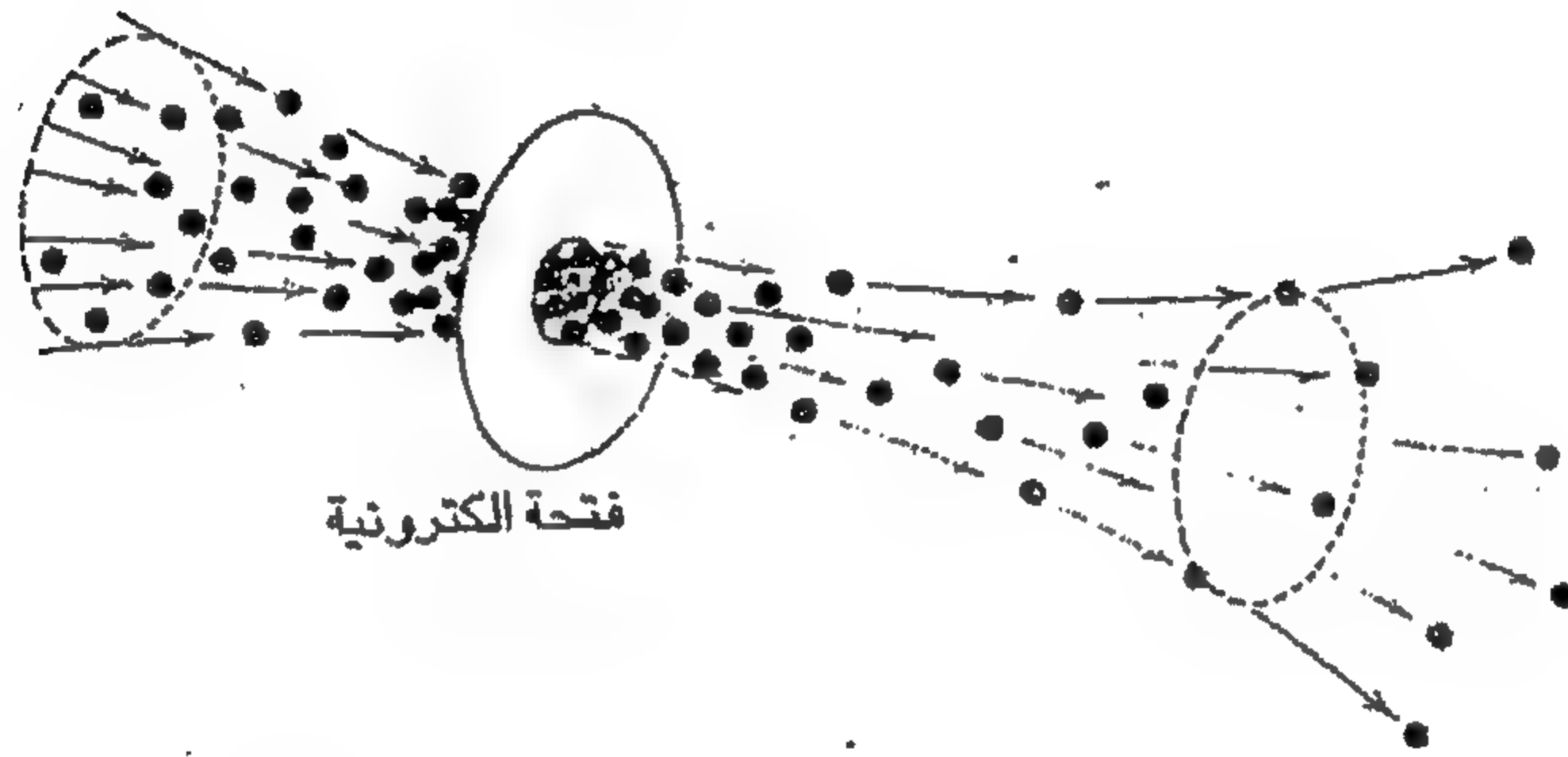
تمثل C_c معام الزيغ اللوني في العدسة الشيئية كما أن :

$$C_c = \delta_0 / f_0 \quad \dots\dots\dots(18-7)$$

δ_0 ثابت تتغير قيمته بين 0.5 و 1 للعدسة الضعيفة او القوية على التعاقب. يمكن التقليل من هذا الزيغ باستخدام اجهزة استقرار الفولتية والتيار. الواقع هناك بعض التغيير في طاقة الالكترونات اثناء مرورها في النماذج السميكة نسبياً ايضاً، مما يؤدي الى نفس الظاهرة على وجه التقريب ولذلك يحبذ استخدام نماذج رقيقة نسبياً او استخدام فولتيات عالية جداً كما في حالة المجهر الإلكتروني النافذ ذو الفولتية العالية (High Voltage Transmission Microscope)



(a)



(b)

الشكل (12-7) الزيغ اللوني وزيغ شحنة الحيز (a) الزيغ اللوني (b) تأثير شحنة الحيز (بصورة مبالغ فيها).

٧-٥-٥ وضوح الصورة وقدرة تمييز العدسة الشيئية:

لقد تم التنويه عن أن قدرة تمييز العدسة ومن ثم وضوح الصورة تتأثر بمقدار الزيغ الكروي واللوني إضافة إلى الطول الموجي ولو ضمت كل هذه المتغيرات إلى بعضها لتم الحصول على علاقة بين هذه المتغيرات وحد التمييز (δ_{opt}).

$$\delta_{opt} = \sqrt{\delta_{pp}^2 + \left(\frac{\delta_{sp}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{cr}}{2}\right)^2} \quad \dots\dots\dots(19-7)$$

حيث يرمز δ_{pp} لحد التمييز الذي يعتمد على الطول الموجي وكالاتي :

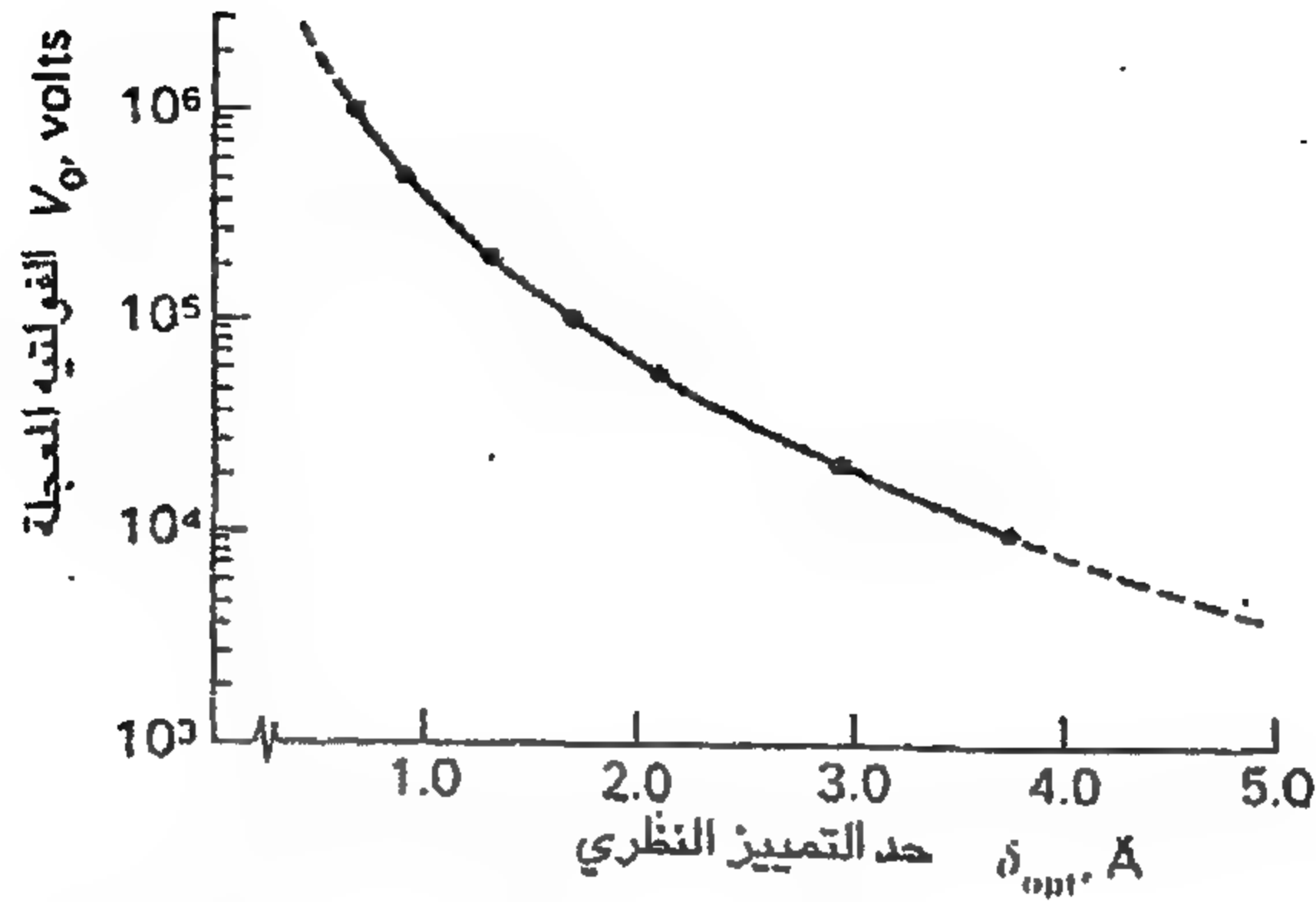
$$\delta_{pp} = \frac{0.61\lambda}{\alpha} \quad \dots\dots\dots(20-7)$$

يستخدم قرص (قطره الكلي بحدود 3mm) يحتوي على ثقب في مركزه يتراوح قطره بين 20 الى 400µm (حسب ما يتلائم وعملية الفحص حيث توجد عادة عدة اقراص في كل مرحلة سواء مرحلة العدسة المكثفة الأولى او الثانية او العدسة الشيئية فيتم اختيار الافضل) لتقليل الزيغ الكروي اولاً وثانياً لمنع مرور الالكترونات المحاده ومن ثم السماح فقط للالكترونات النافذة لتكوين الصورة. يؤدي كل ذلك الى زيادة تبثير الصورة لكنه من مساوئ استخدامه هو الانخفاض الكبير في شدة الاضاءة . يسمى مثل هذا القرص بالفتحة الضوئية (aperture) .

يمكن حساب قطر الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية والتي تمنع الحزم الالكترونية المحاده عن اول مستوى حيود او ثاني... إذا كان النموذج المفحوص مادة بلورية القوام. أما إذا لم تكن المادة بلورية فإن الفتحة الضوئية سوف تزيد ايضاً من تبثير الصورة باعتبار ان ادخال الفتحة الضوئية عند العدسة سيققل من الزيغ الكروي.

يبين الشكل (7-13) تغير حد التمييز المحسوب δ_{opt} مع تغيير الفولتية المعجلة V_o .

يمكن حساب قطر الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية التي تمنع الحزمة الالكترونية المحاده من اول مستوى حيود، على سبيل المثال، لنموذج من مادة بلورية ولتكن الالمنيوم (Al).



الشكل (7-13) حد التمييز النظري كدالة للفولتية المعجلة في المجهر الالكتروني.

فمن معادلة براك للحيود (تصلح لكل أنواع الحيود سواء حيود الاشعة السينيه او الالكترونات....) $2d \sin \theta = \lambda$ (المعادلة 5-5) وحيث أن بنية الألمنيوم هي FCC (مكعب متمركز الوجه) وبموجب معامل البنية الذرية (F) (الجدول (5-2) يكون اول مستوى يمكن ان يعمل على حيود (او انعكاس) الالكترونات (reflecting plane) هو (111) .

ولو أخذنا علاقة (d) مع أدلة ملر للمستوى العاكس (معادلة 5-3) للبلورة المكعبه وهي:

$$d = \frac{a}{h^2 + k^2 + l^2}$$

حيث تمثل a ثابت البلورة 4.05\AA للألمنيوم.

فيمكن حساب (d) للإنعكاس (111). يتم تعويض قيمة (d) في معادلة براك (معادلة 5-5) إضافة الى تعويض قيمة الطول الموجي (λ) للحزمة الالكترونية عند فولتية معجلة محدده (معادلة 7-7) عندئذ يمكن حساب زاوية الحيود (θ) .

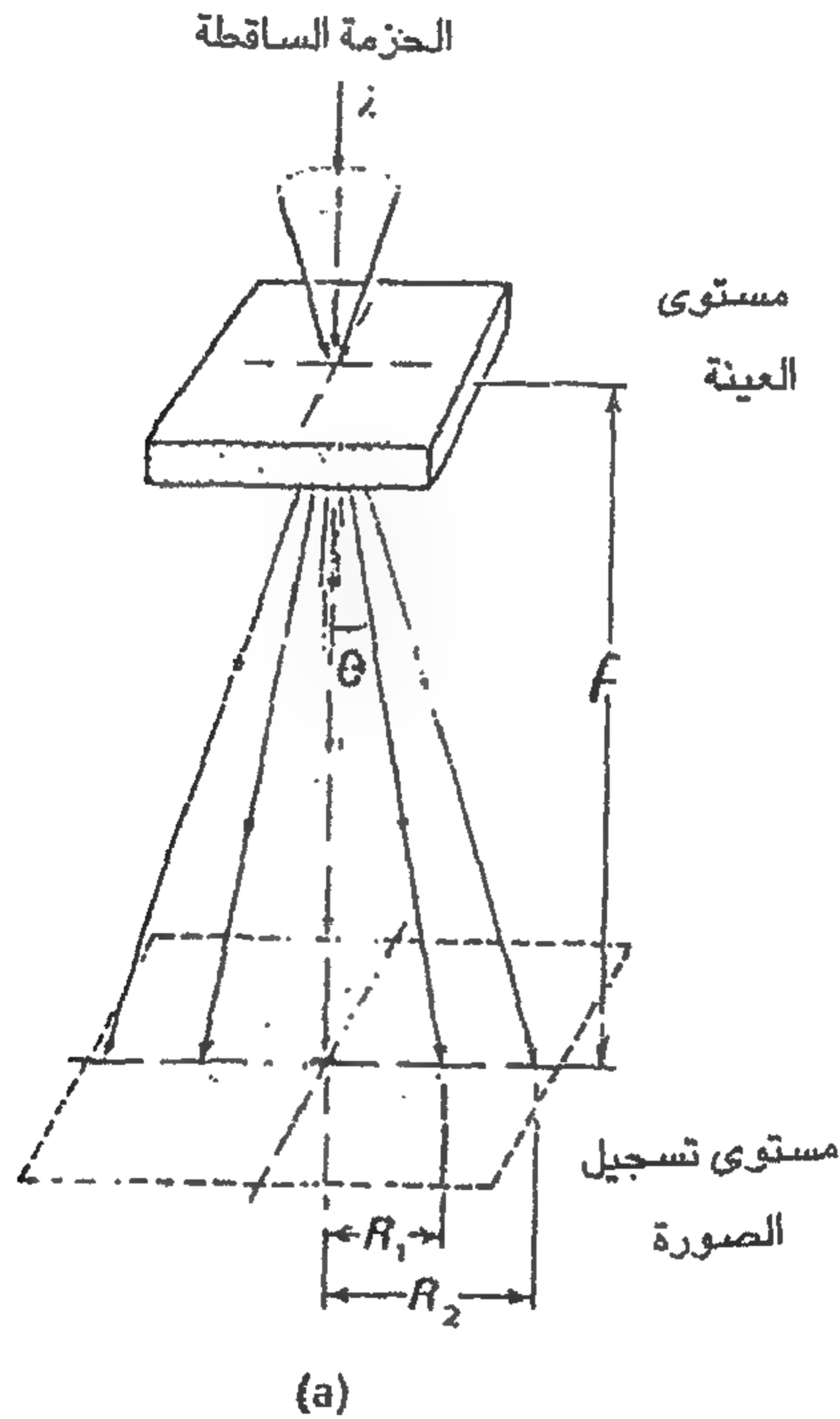
ولإيجاد نصف قطر الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية (R) يمكن تأمل الشكل (14-7) فعند معرفة البعد البؤري (f) فإن:

$$\tan 2\theta = \frac{R}{F} \quad \dots\dots\dots (21-7)$$

R نصف قطر حلقة (خط) الحيود الخاصة بالمستوى الأول (111) . وإذا كانت الزاوية 2θ صغيرة فيمكن تقريب المعادلة (21-7) لتصبح:

$$R = 2\theta f \quad \dots\dots\dots (22-7)$$

أما إذا لم يكن البعد البؤري للعدسة الشيئية معلوماً فيمكن استخدام المعادلة (12-7) لحسابه مع الأخذ بنظر الاعتبار العامل الهندسي والتيار المار وعدد اللفات الخاصة بالعدسة الشيئية.

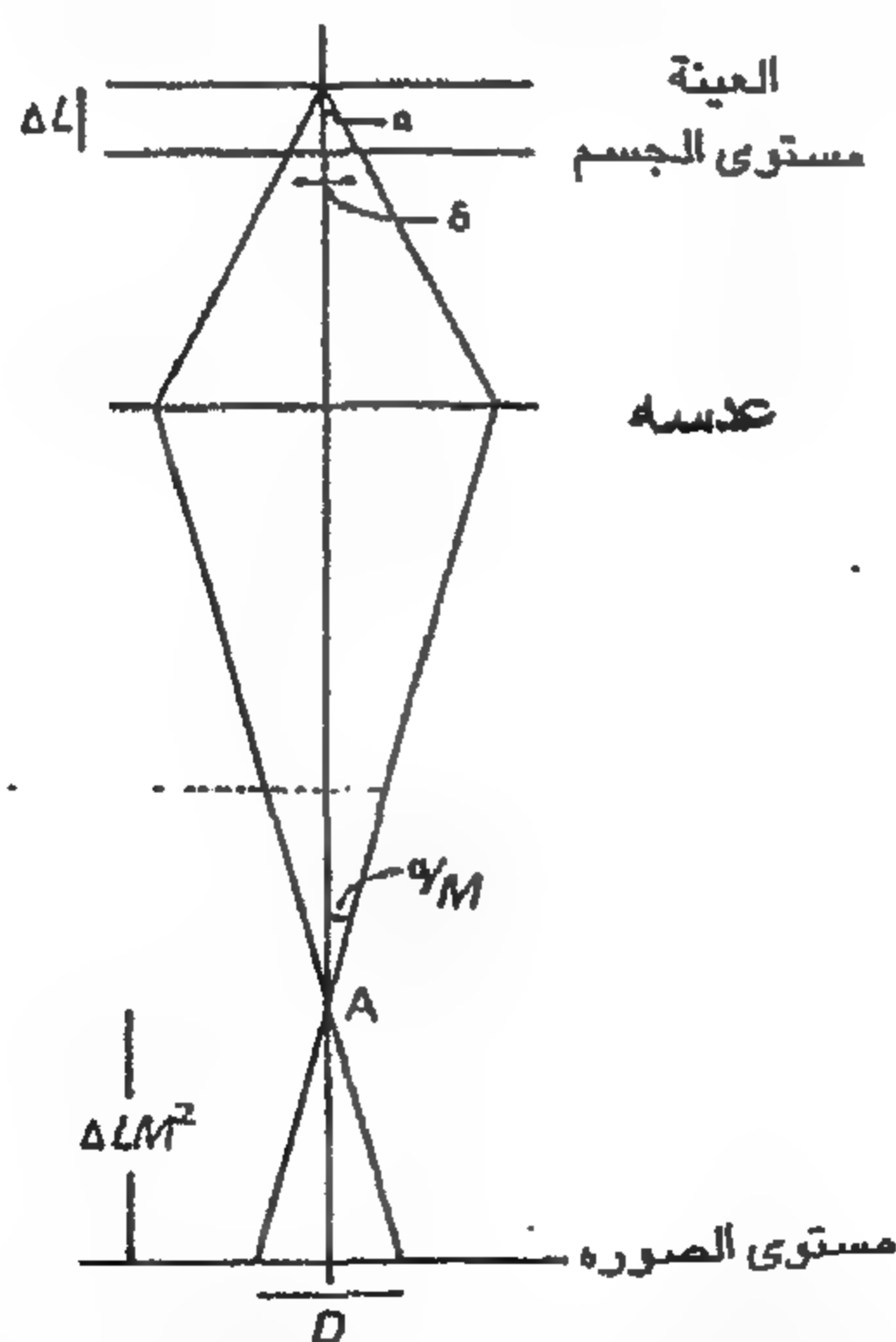


الشكل (14-7) هندسة تكوين نمط حيود الإلكترونات النافذة.
تُرى حلقتي حيود لمستويي الانعكاس الأول والثاني.

ومن الناحية العملية تؤخذ نصف القيمة المحسوبة لنصف القطر لضمان المنع الكامل لإشتراك الالكترونات المحادة عن اول مستوى انعكاس من النموذج في تكوين الصورة، اي تستخدم فتحة ضوئية عند العدسة الشبئية ذات قطر يساوي نصف القطر المحسوب نظرياً بالطريقة اعلاه.

٦-٥-٧ عمق المجال وعمق التبئير Depth of field & Depth of focus

يعرّف عمق المجال في المجهر بأنه المسافة الواقعة على المحور الأساس والتي يمكن للجسم ان يتحرك خلالها من دون النقصان الواضح لقدرة التمييز. فإذا تحرك النموذج مسافة مقدارها ΔL مبتعداً عن المستوى الذي يتم تبئير العدسه الشبئية عنده فستظهر صورة اي نقطة في الجسم بمثابة قرص على الحاجز الذي تظهر عليه الصورة . ولو لوحظ الشكل (7-15)، لظهر انه إذا أزيح النموذج مسافة مقدارها (ΔL) عن مستوى الجسم الحقيقي للعدسة فالأشعة الخارجة من نقطة على النموذج داخل مخروط الأشعة ذو الزاوية النصفية (α) ستبدو وكأنها صادرة عن قرص ذو قطر مقداره $\delta = 2\alpha\Delta L$ في مستوى الجسم. لذلك تولد الازاحة ΔL عدم وضوح (blurring) في تفاصيل الصورة مقابل عدم وضوح مقداره ($2\Delta L\alpha$) في النموذج. وإذا ما أريد المحافظة على قدرة تمييز المجهر فيجب ان تكون (δ) اقل من اصغر التفاصيل المراد تمييزها.



الشكل (7-15) يبين علاقة عمق المجال بعمق التبئير.

فعلى سبيل المثال، إذا فرض ان $\alpha = 6 \times 10^{-3} \text{ rad}$ وتم أخذ حد التمييز $= 400 \text{ pm}$ ، فعندها يجب ان لا يزيد ΔL عن حوالي 40 nm إذا ما أريد المحافظة على هذا الشرط. ليعطينا عمق مجال مقداره $2\Delta L$ والذي يمكن للنموذج ان يتحرك خلاله حيث يساوي في هذه الحالة 80 nm . وهذا المقدار أكبر من السمك الاعتيادي للنماذج المستخدمة في الاشغال التي تتطلب قدرة تمييز عالية جداً. ومن الناحية العملية فيمكن اعتبار حد تمييز مقداره 2.5 nm مقبولاً، وفي هذه الحالة فإن عمق المجال المتيسر سيكون 400 nm . والقيمة الاخيرة اكبر من سمك النماذج المستعملة لحد التمييز هذا، يتبين من ذلك انه تحت الظروف الاعتيادية فإن عمق المجال يكون كافياً لتمييز كل النقاط على مختلف الاعماق في النموذج آنياً.

يعرف عمق التبئير للصورة بأنه المسافة التي يمكن ان يتم بها تحريك حاجز الصورة بدون ان يؤثر ذلك على قدرة التمييز ويمكن ان تحسب بنفس الاسلوب السابق. تبين الادلة الهندسية البسيطة انه إذا كان مقدار التكبير الخطي للجهاز هو M ، فعندئذ إذا تحركت نقطة في الجسم مسافة مقدارها ΔZ فالصورة الخاصة بها تتحرك مسافة مقدارها $M^2 \Delta Z$. اذن إذا كان عمق المجال في مستوى الجسم هو $2\Delta L$ ، فيكون عمق التبئير للصورة هو $2M^2 \Delta L$.

فلو أن قوة التكبير كانت $M = 2 \times 10^4$

وكانت $\Delta L = 400 \text{ nm}$

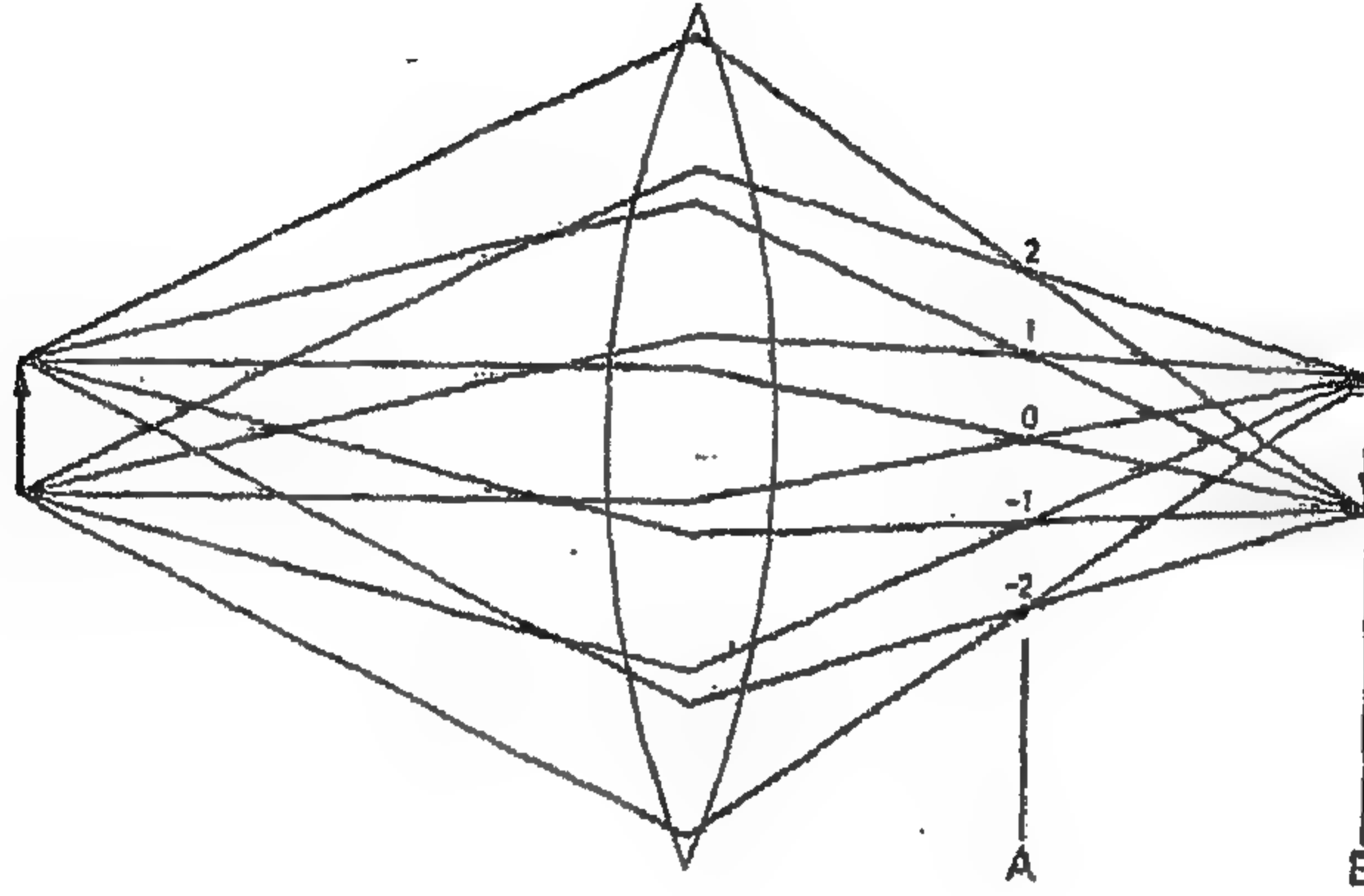
فسيكون عمق التبئير هو 320 m . فليس من الضروري كنتيجة لذلك اعادة تبئير المجهر الالكتروني لأجل الحصول على صورة حادة المعالم على اللوح الفوتوغرافي (التصوير) الواقع على بضع سنتيمترات تحت مستوى حاجز رؤية الصورة.

٧-٥-٧ تقنية حيود الإلكترونات Electron Diffraction Technique :

أ- المقدمة:

تعطي تقنية الحيود ، على سبيل المثال طريقه دبي شرر - Debye scherrer method) لحيود الاشعة السينية، معلومات كثيرة حول بنية المادة. لأن نمط الحيود في الواقع ليس إلا صورة للنموذج في الحيز المقلوب او في حيز فورير (fourier space) . ومن هنا يفهم ان هناك علاقة مترابطة ووثيقة جداً بين نمط الحيود للنموذج وصورته ونظراً لأن استخدام تقنية الحيود تستعمل لاستخلاص معلومات عن بنية النموذج وبتمييز عال جداً يصل الى المستوى الجزيئي او الذري لذلك صارت المعلومات المستقاة من صورة النموذج ونمط حيوده تكمل احدهما الاخرى. يمكن فهم الفرق بين نوعي المعلومات المستخلصة من الطريقة التصويرية وتقنية الحيود من الشكل (7-16) والذي يبين بدوره العلاقة بين نمط الحيود والصورة لنموذج معين. فعند إضاءة النموذج بأشعة متوازية احادية الطول الموجي ، فالزاوية التي يحاد بها الشعاع تعتمد على الطول الموجي للأشعة وعلى المسافة البينية واتجاه معالم البنية التي تسبب الحيود . ولذلك تكون كل الحزم المحادة من البنى المتشابهة في النموذج متوازية ومن ثم تتبثر في المستوى البؤري للعدسة. وهذا المستوى هو المستوى A في الشكل (7-16) حيث يتكون نمط الحيود، ولمختلف المراتب، عند هذا المستوى . أما اذا تمّ تعقب اثر الاشعة بعيداً عن العدسه فسيلاحظ تكون (نشوء) الصورة من اتحاد الاشعة لمختلف الحزم المحادة. تتكون الصورة عند المستوى B . ويجب ان تتماثل المعلومات المستقاة من نمط الحيود و الصورة في المجهر (مالم يتم ادخال فتحة ضوئية بين المستويين A و B لتحديد المعلومات) لكنها تتوزع بشكل مختلف. يتضمن نمط الحيود مجمل معلومات عن النموذج ككل في

حين تتجمع المعلومات من نقطة فنقطة في الصورة الاعتيادية لتؤلف مجمل المعلومات عن النموذج.



الشكل (7-16) العلاقة بين الصورة ونمط الحيود . تغادر الرتب المحاذية (2.1.0) المختلفة الجسم ، كحزم متوازية من الأشعة . تبث هذه الحزم في المستوى البؤري الخلفي (A) للعدسة وتتحد لتكوين الصورة عند المستوى (B) .

يمكن بصوره عامة تحديد كاميرات الحيود ذات الاهمية اضافة تقنيات التصوير المختلفة . تعتبر طرائق الحيود هي الافضل عند تطلب معلومات لمعدل كل مساحة النموذج تحت الفحص ، على سبيل المثال تطبيقات طرائق الحيود لتعيين البنية البلورية . بينما لاتستخدم طرائق التصوير الاعتيادي لهذا الغرض حيث ان التباين

الصورى غير كافى عادة لتمييز وحدة الخلية البلورية نفسها. يمكن ان يساعد المجهر الالكترونى ذو قدرة التمييز العالية او مجهر أنبعاث المجال (field emission microscope) فى تعيين الشكل العام المعقد للجزئية العضوية ومن ثم يساعد فى تحليل البنية والى مدى معين، فى حين ان مجهر ايون المجال (field ion micro-scope) يكون صورته للذرات لكنه لسوء الحظ لا يمكن استخدامه إلا لعدد محدود من المواد. ويؤثر اى تغيير قد يحدث فى بنيه النموذج فى نمط الحيود لكن طرائق التصوير الاعتيادى تستخدم فى تعيين تفاصيل توزيع الماهيات الدقيقة للبنية.

تتشابه ظاهرة حيود الالكترونات والنيوترونات مع حيود الاشعة السينية وكلها تتمخض عن معلومات اجمالية عن النموذج لكن تقنية كل منها تختلف عن الاخرى لان تفاعل كل من الاشعة السينية والالكترونات مع المادة مختلف.

فمعاملات تشتت الالكترونات اعلى بصورة عامة من تلك التى للأشعة السينية وخصوصاً بالنسبة للعناصر الخفيفة.

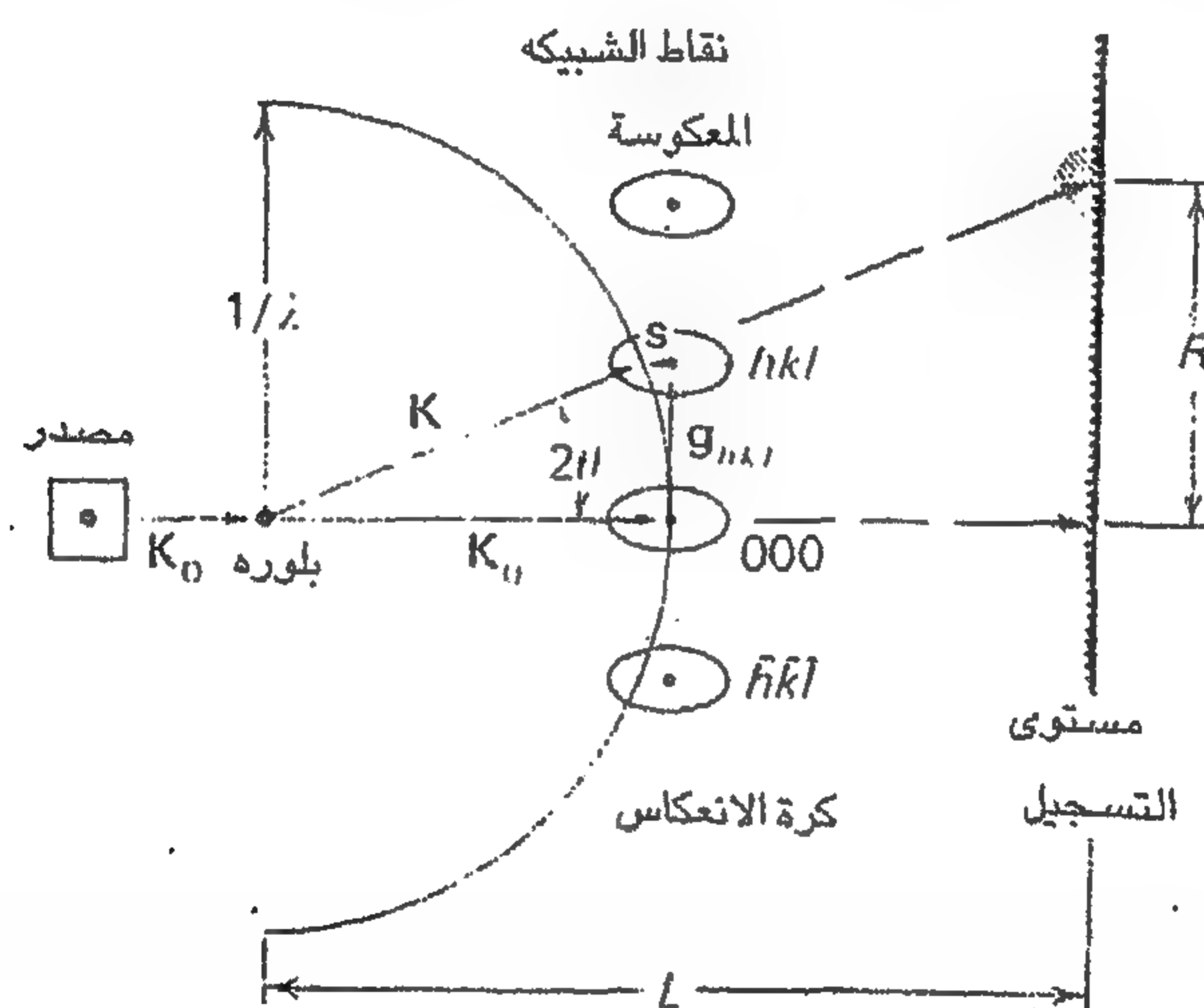
يمكن ان تزودنا المجاهر الالكترونية بالصور الاعتيادية وكذلك بانماط حيود الالكترونات من مناطق مختاره من هذه الصور. وهذه الامكانية فى الحصول على صورته ونمط حيود الالكترونات لمنطقة معينه من النموذج حققت امكانية ممتازة على تزويدنا بمعلومات عديده ومتكاملة عن النموذج.

ب- الطبيعة الهندسية لانماط حيود الالكترونات:

بما أن البلورة عبارة عن ترتيب هندسي منتظم معاد من الذرات، فيتوقع ان تكون انماط الحيود الناتج عن البلورات محتفظة هي الأخرى بانتظام متشابه حتى ولو كانت المنطقة المسببه للحيود متكونة من مجاميع عشوائية الاصطفاف من هذه البلورات. ومن المعلوم ان شرط الحيود يتحقق عندما تقطع كرة الانعكاس نقاط

الشبيكة المعكوسة (reciprocal- lattice point) سواء كانت جزء من مقطع بلوره كبيره او نقاط شبيكة معكوسة لبلوره صغيرة متجهة من مادة متعددة البلورات.

تكون متجهات الشبيكة العكسية أصغر بكثير من نصف قطر كرة الانعكاس الخاصة بتلك البلورة اي ان كرة الانعكاس تقطع مقطعاً مستوياً من الشبيكة المعكوسة والى تقريب جيد . وعند وضع هذا المعنى في الذهن فالعلاقة الهندسية بين الشبيكة المعكوسة ونمط الحيود تسجل على الحاجز المتألق للمجهر الالكتروني او على اللوح الفوتوغرافي أو اية وسيلة أخرى ، يبين الشكل (7-17) ذلك. فإذا كانت R هي المسافة بين مركز نمط الحيود (000) الى نقطة الشبيكة المعكوسة (hkl) كما تقاس من اللوح الفوتوغرافي الموضوع على مسافة مؤثرة مقدارها L من البلورة التي تعمل الحيود او البلورات العمودية على اتجاه متجه الحزمة الساقطة (X_0) وعندها يكون :



الشكل (7-17) مساقط شدة الحيز المعكوس على مستوى التسجيل (لوح التصوير) لاحظ العلاقة المبالغ فيها لكرة الانعكاس مع نقاط الشبيكة المعكوسة. ومن الناحية العملية فإن لكرة الانعكاس مقطع مستوي تقريباً.

$$\frac{|g_{hkl}|}{\frac{1}{\lambda}} = \frac{R}{L} \quad \text{or} \quad R = \lambda L |g_{hkl}| \quad \dots\dots\dots (23-7)$$

حيث يمثل g_{hkl} متجه الشبكة المعكوسة (reciprocal Lattice) ويكون عمودياً على K_0 و S . أما الانحراف عن كرة الانعكاس فيهمل. يلاحظ من المعادلة (23-7) ان انصاف الاقطار المقاسة في نمط حيود الالكترونات تساوي ببساطة مقادير متجهات الشبكة المعكوسة مضروبه في عامل التدرج. يمكن، من الشكل (7-17)، اعتبار أن نمط الحيود كمسقط لنقاط الشبكة المعكوسة مسجلاً على اللوح الفوتوغرافي (مستوى التسجيل). ان هيئة وتوزيع شدة نمط الحيود تعتمد على شكل البلوره ونوع البنية البلورية والتكوين الكيماوي.

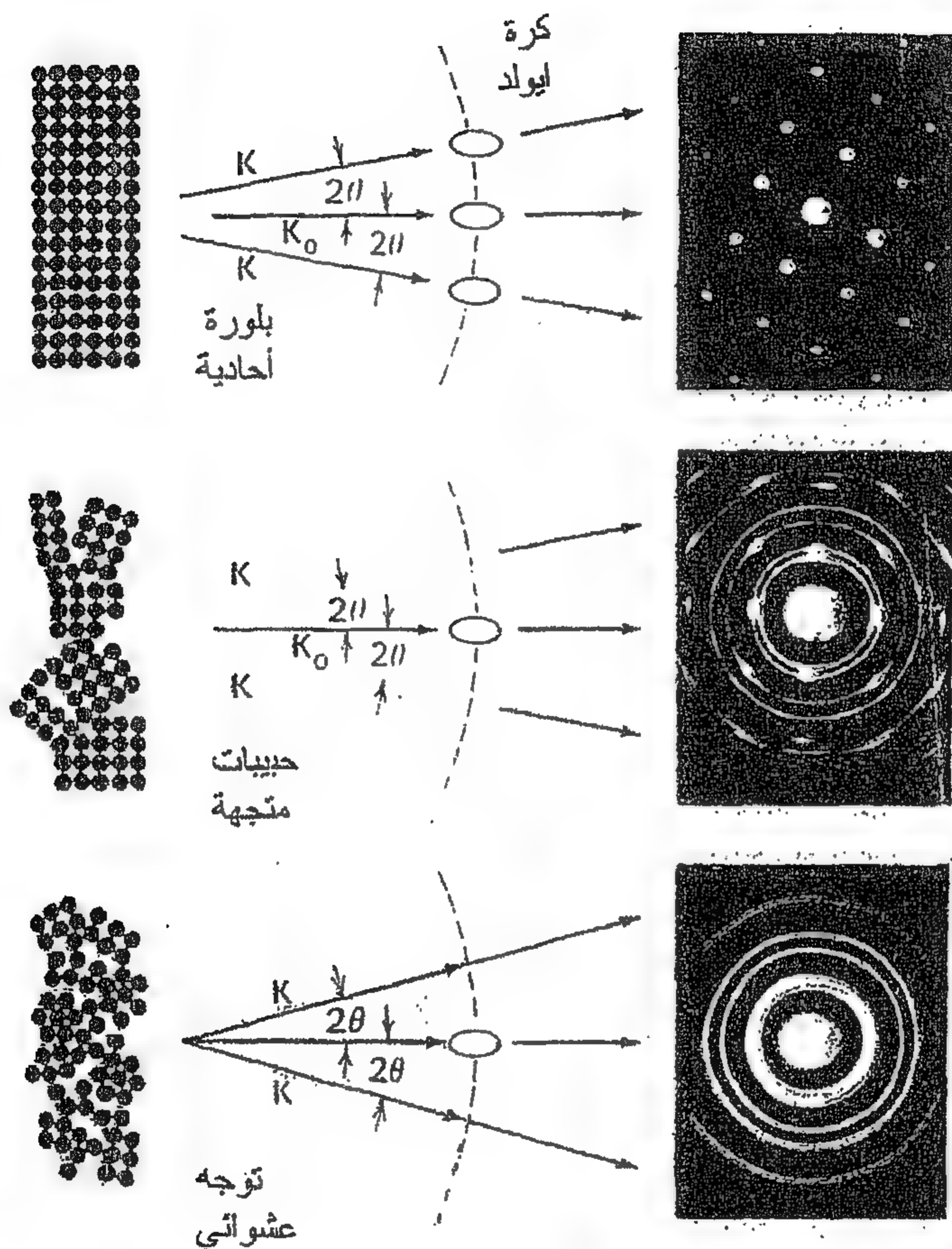
ج- انواع نمط حيود الالكترونات:

يتعلق نوع وصفات حيود الالكترونات ، بلاشك، بأسلوب الحيود لكنه يعتمد بالدرجة الاساس على صفات النموذج اي بمعنى آخر على تكوينه الكيماوي وبنية بلورته وابعادها واتجاهها وتوزيع مختلف مكوناته او بلوراته المتعددة في منطقة الحيود.

يتميز حيود الالكترونات أساساً بهيئته النقطية اذا كانت منطقة الحيود متكونه من بلوره احاديه او مجموعه من بلورات بينهم فرق قليل في الاتجاه اي أن لها اتجاه عام واحد في حين تكون انماط الحيود على هيئة حلقات إذا كانت منطقة الحيود مكونه من مجاميع بلوريه عديده متجهة بشكل عشوائي بالنسبة لبعضها البعض، أما الدرجات المتفاوته من شدة (إضاءة) الحلقات او النقاط فيمكن ان تكون مؤشراً على مقدار عدم التطابق في الاتجاه او النمط النسبي للتجمعات البلورية.

يبين الشكل (7-18) كيفية تكوين أنماط حيود الالكترونات وعلاقتها بصفات العيقة المفحوصة. ومن الجدير بالذكر ان الشكل (7-18) يمثل حالاتٍ نموذجية.

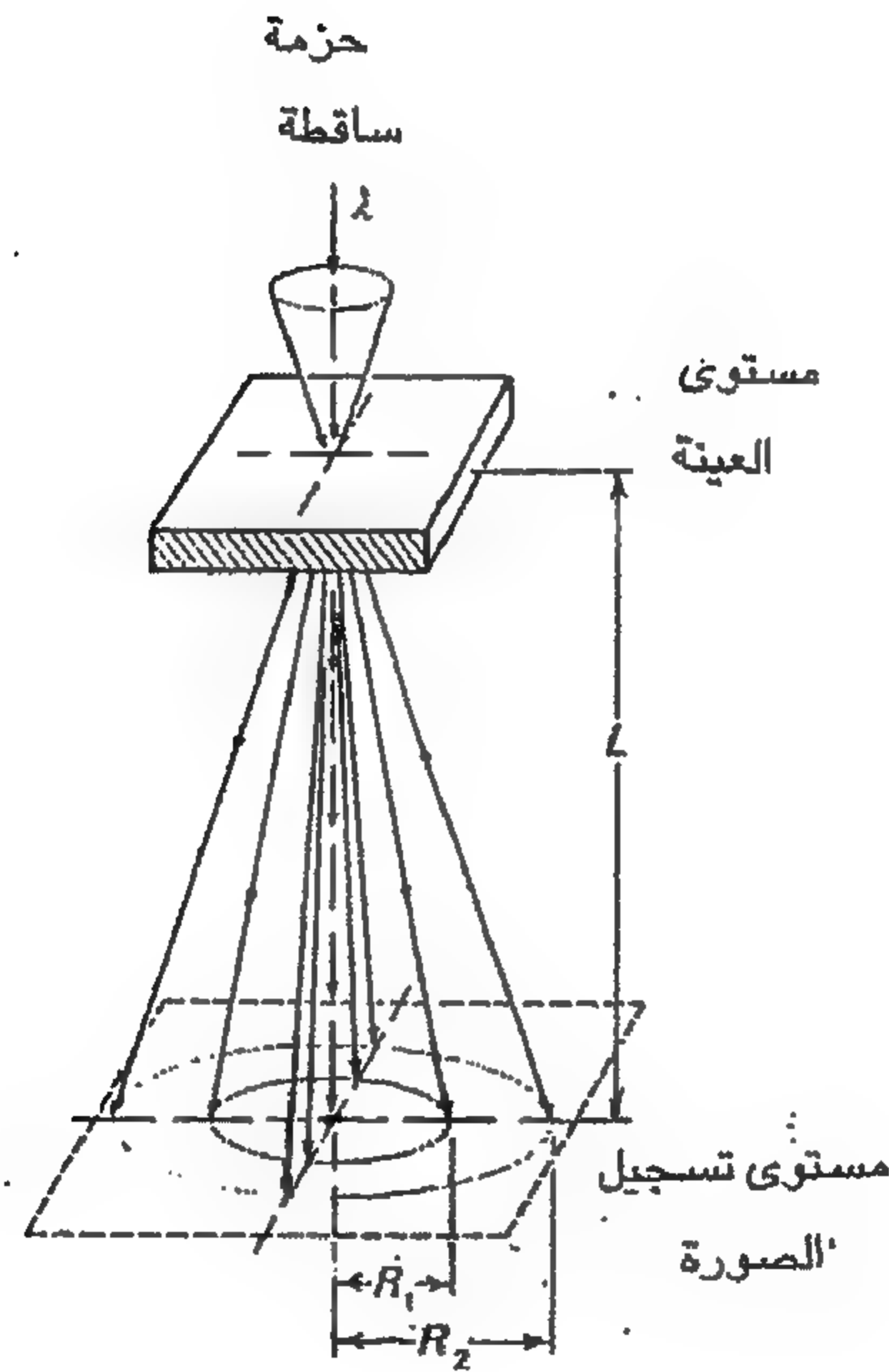
يمكن أن يمثل الشكل آنف الذكر أنماط حيود الالكترونات ذات الطاقة العالية اي كالذي يحدث عادة في المجهر الالكتروني النافذ حيث تكون العينه ذات مقطع خفيف جداً.



الشكل (7-18) تأثير بنية النموذج على تكوين

أنماط الحيود لأغشية من الذهب.

يلاحظ أن أنماط الحيود ذات النوع الحلقي تنشأ من مخاريط الحيود وذلك بتقاطع كرة الانعكاس بالصفوف المستمرة من نقاط الشبكة المعكوسة (reciprocal lattice points) والتي تعتبر ككرات متحدة المركز في الفضاء العكسي (reciprocal space) لذلك يمكن وصف الحيود الناتج من التجمعات (المواد) المتعددة البلورات كصفوف من دوائر انعكاس منتظمة على اللوح الفوتوغرافي (لوح التصوير) كما مبين في شكل (7-19) في حالة الإلكترونات النافذة.



الشكل (7-19) الهندسة البسيطة لتكوين أنماط حيود الإلكترونات النافذة.

يوضح الشكل (7-20) أنماط حيود حلقي من النوع النافذ لعدد من البنى البلورية المأخوذة لأغشية رقيقة ناتجة من تبخير المواد المشار إليها، يعين ترتيب الحلقات الناتجة وشداتها النسبية بوساطة معامل البنية الذري الذي سبق ان تمت الإشارة اليه (فصل حيود الاشعة السينية). يلاحظ من ذلك ان كل سطوح الانعكاس (hkl) ممكنة في حالة بنية المكعب البسيط. لذلك يتضمن نموذج حيود الالكترونات للمغنيز (Mn) المتعدد البلورات (بنية مكعب بسيط) كل سطوح الانعكاس {hkl}. مع زيادة انصاف اقطار الحلقات بزيادة قيم g_{hkl} كما يستنتج من المعادلة (7-23).

د- معايرة أنماط الحيود الالكتروني وقياس ثابت الكاميرا (λL):

يمكن من المعادلة (7-23) ملاحظة ان بعد النقاط عن المركز او انصاف أقطار الحيود تتناسب مع مقدار متجه الشبكة العكسية $|g_{hkl}|$ وأن ثابت الكاميرا (λL). يمكن تعيين ثابت الكاميرا إذا تأملنا الشكلين (7-19) و (7-20) أي أن :

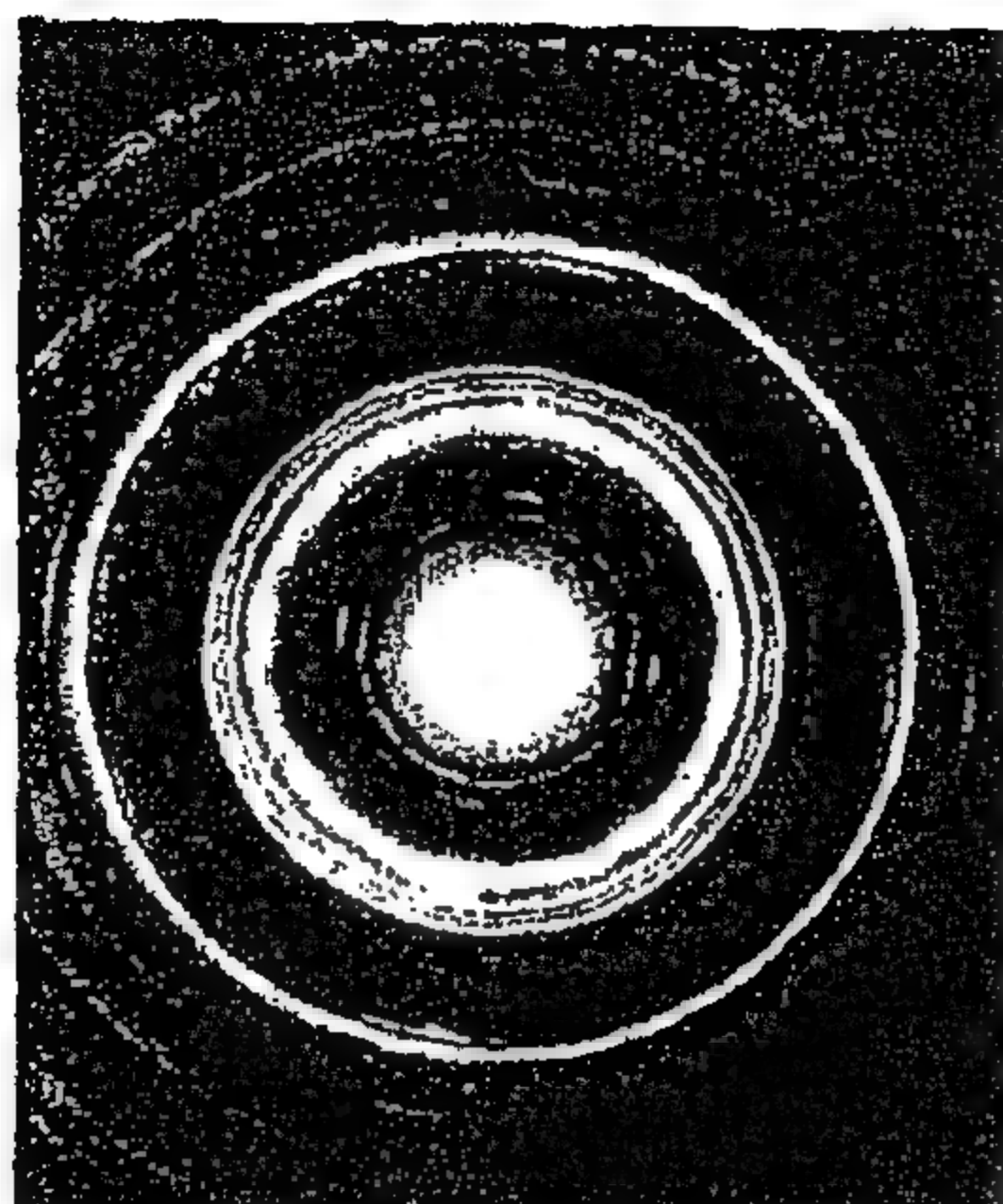
$$\lambda L = \frac{R}{|g_{hkl}|} = R d_{hkl} \quad \dots\dots\dots (7-24)$$

حيث تمثل d_{hkl} المسافة بين المستويات الذرية في المادة البلورية لأي من مستويات الانعكاس المعينه {hkl} و R هو نصف قطر خط الحيود المعين . فلو تأملنا على سبيل المثال، بلوره المكعب فإنه بتعويض المعادلة (3-5) ($d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}}$) في معادلة (7-24) ينتج ان :

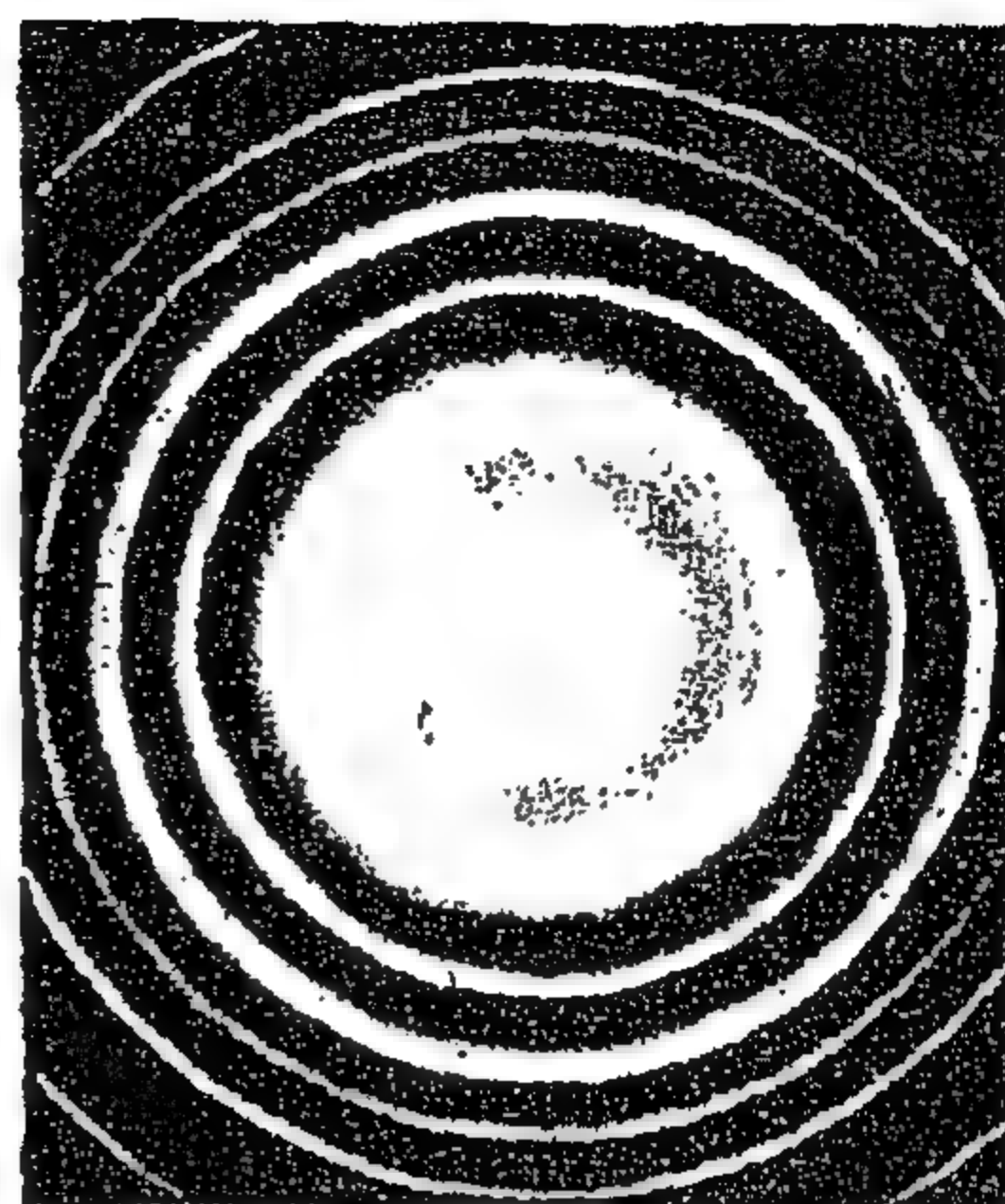
$$h^2 + k^2 + l^2 = \frac{a}{\lambda L} R \quad \dots\dots\dots (7-25)$$

حيث يمكن ملاحظة ان المعادلة اعلاه (7-25) على هيئة معادلة الخط المستقيم

$$(y=mx) \text{ فيكون } y = \sqrt{h^2+k^2+l^2} \text{ والانحدار } m = \frac{a}{\lambda L} \text{ و } R=x \text{ وكما مبين في}$$



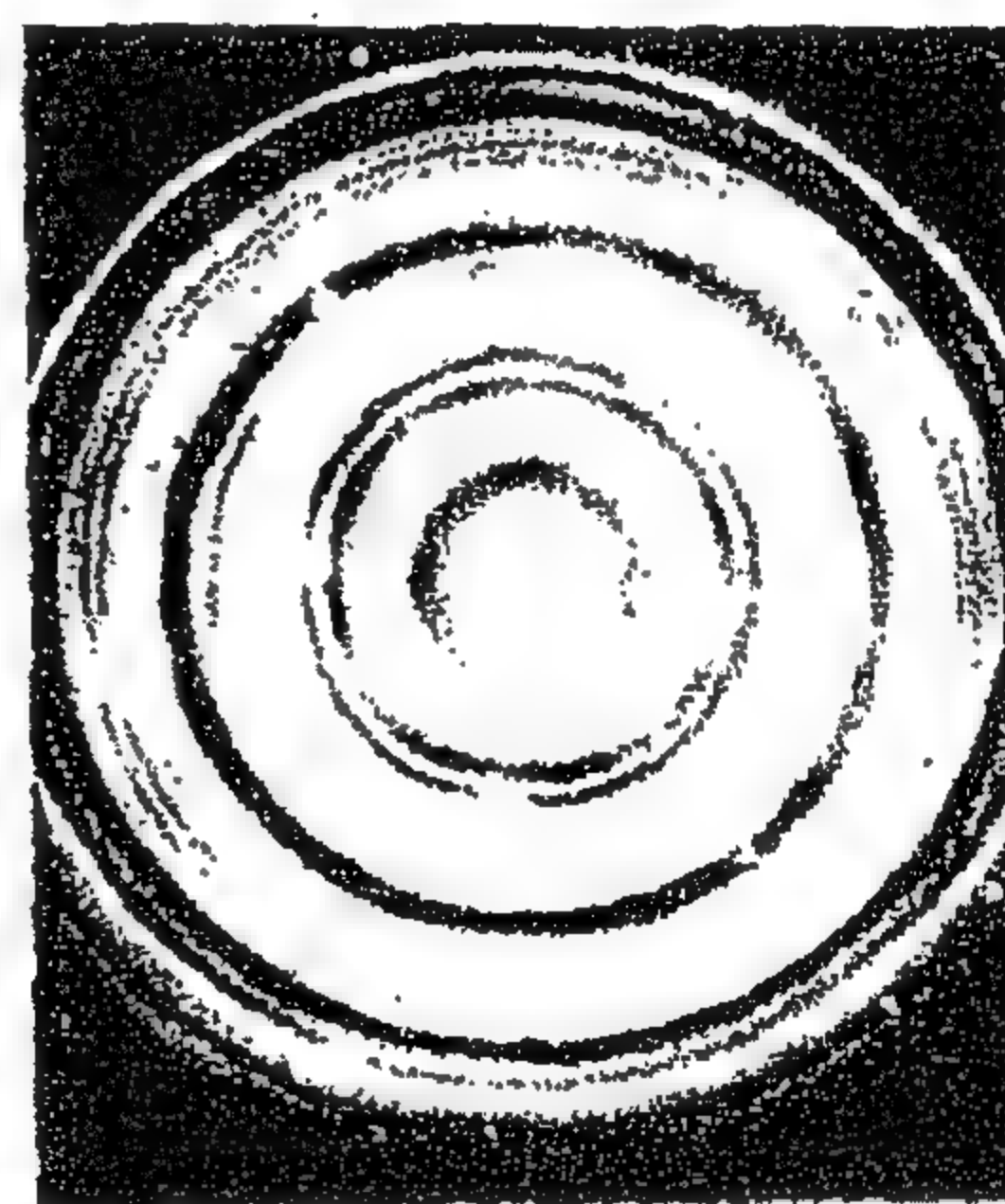
(a)



(b)



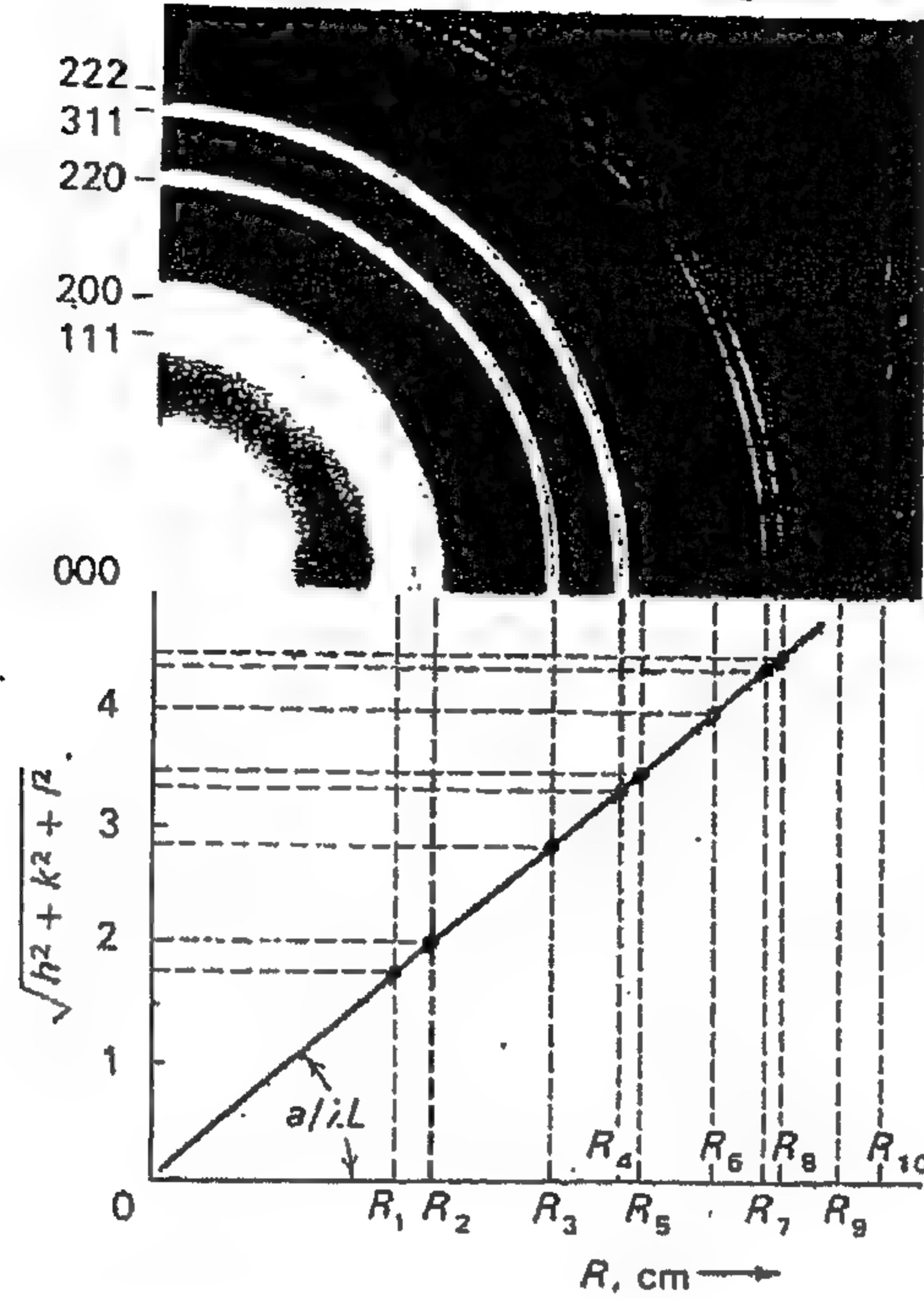
(c)



(d)

الشكل (20-7) أنماط حيود حلقيه للإلكترونات النافذة من أغشية رقيقة متعددة البلورات β -Mn (a) مكعب بسيط (b) Fe (bcc) و (c) Rh (fcc) فيه اتجاه تفضيلي قليل (d) Er (hcp) أما النقاط الظاهرة فهي من بلورات مجاوره لها تكوين كيمائي وبنية بلوريه مختلفين عن العنصر الاساس Er.

الشكل (21-7) ،حيث يمكن تعيين ثابت الكاميرا بسهولة من الانحدار $m = \frac{a}{\lambda L}$ لأية مادة معلومه . يلاحظ من الشكل (21-7) ان قيم $\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$ والقيم المتعلقة بها لإنصاف أقطار حلقات الحيود عند المستويات الممكنة (hkl) تعتمد ، في حالة البنية البلورية المكعبة، على كون المادة ذات بنية مكعب متمركز الجسم (bcc) أم مكعب متمركز الوجه (fcc) وهكذا . وحيث ان نمط الحيود في الشكل (21-7) هو في الواقع لبنية المكعب المتمركز الوجه (Fcc) وهي قطعة رقيقة من النيكل وقد رسمت قيم $\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$ التي يمكن حساب قيمها حسب معيار معامل البنية الذرية (atomic structure factor) او من جدول (3-7) الذي يحتوي على أدلة سطوح الانعكاس الممكنة {hkl} للبنى البلورية الشائعة ومن ثم يتم تعيين الحلقات الخاصة بالسطوح كما في الشكل (21-7) . يمكن ملاحظة ان علاقة خطيه يتم الحصول عليها لكل بنية بلورية وذلك بمقارنة المعادلة (24-7) مع معادلة الخط المستقيم ($y=mx$) حيث يكون $y = \frac{1}{d_{hkl}}$ و $m = \frac{1}{\lambda L}$ وأن $x = R$ تحسب المسافة بين سطوح الانعكاس ومن معرفة معلمات الشبكة البلورية تتم معرفة نوع المادة او ثابت الكاميرا وتعرف البنية البلورية للمادة من شكل نمط حيود الالكترونات، فعلى سبيل المثال، يكون أسلوب ترتيب خطوط نمط الحيود الالكتروني لمادة متعددة البلورات صغيرة الحجم الحبيبي وذات بنية (fcc) كالاتي خطين متقاربين يليهما خط منفرد بعيداً عنهما نسبياً ثم خطين فخط وهكذا، أما بالنسبة لبنية (bcc) فيكون نمط الحيود على شكل خطوط (حلقات) منفردة تبعد بابعاد متساوية عن بعضها تقريباً وهكذا فلكل بنية بلورية نمط حيودها المميز. وبعبارة أخرى يمكن معرفة اي مجهول إذا علمت بقية العوامل الاخرى في المعادلتين (5-3) و (24-7) .



الشكل (21-7) معايرة أنماط الحيود الإلكتروني. ينتج خط مستقيم عند تقاطع قيم $h^2 + k^2 + l^2$ مع انصاف أقطار حلقات الحيود للنيكل (fcc). انحدار المستقيم يساوي ثابت الكاميرا، λL .

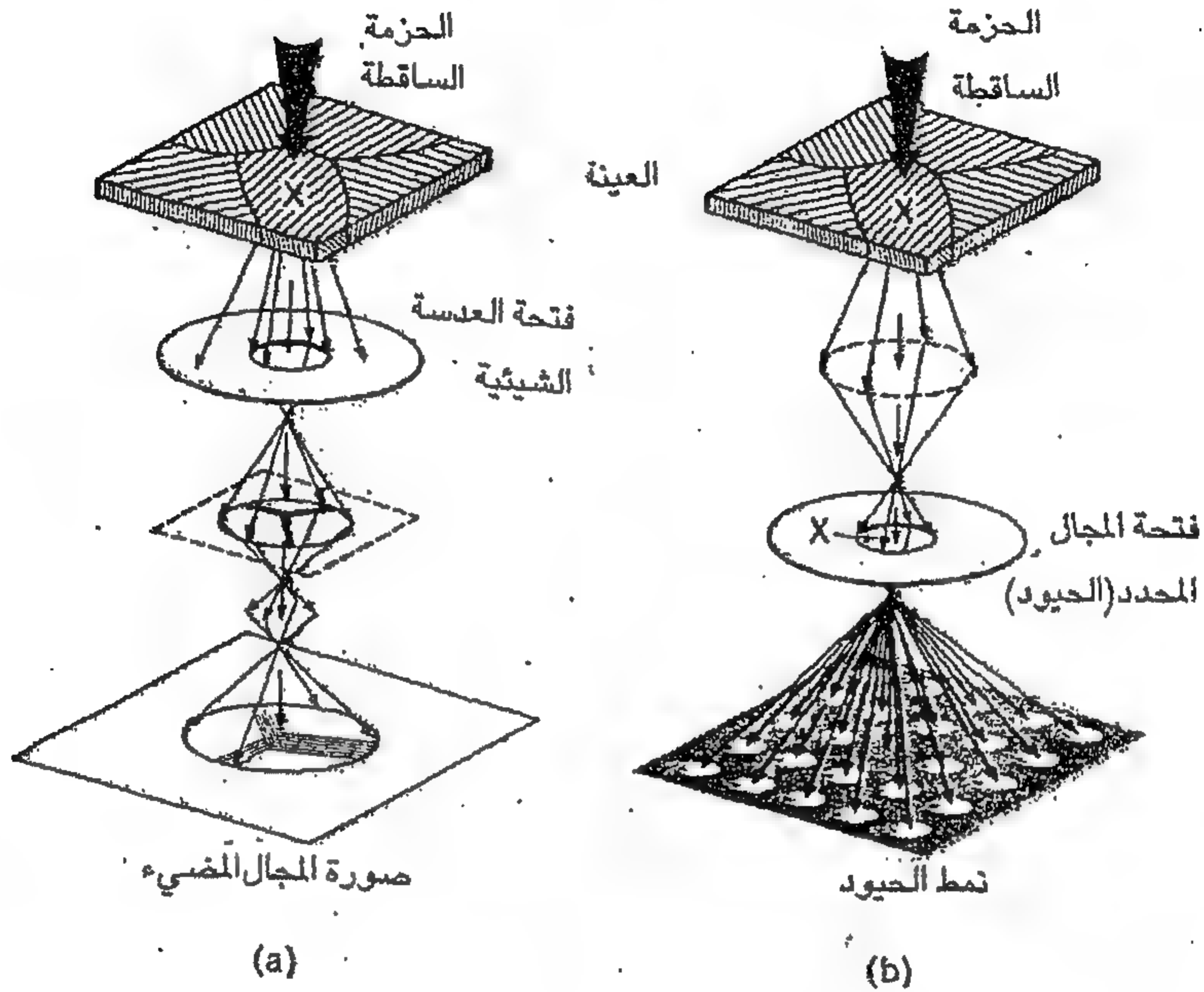
تتغير بالطبع قيمة ثابت الكاميرا (λL) بتغير الفولتية المعجلة أو موضع العينة. وقد تمت الإشارة سابقاً إلى علاقة λ مع الفولتية المعجلة في المعادلتين (7-7) و (9-7). أما L فهي المسافة الحقيقية بين صورة نمط الحيود المتكونه على الحاجز (screen) ومكان العينة وفي حالة ثبوت مكان العينة تماماً بالنسبة للعدسة الشيئية، فإن L سيكون ثابتاً أيضاً. والواقع أن L تتغير قليلاً بسبب بعض تأثيرات التسخين أو التبريد أو تدوير أو إمالة العينة إلى آخره.

جدول (3-7) الانعكاسات {hkl} الممكنة لبنى البلورات bcc و Fcc ومكعب الماس (diamond cubic) و (hcp). * سطوح لها قيم متكافئة من |g|.

bcc{hkl}	fcc{hkl}	diamond{hkl}	hcp	
			{hkl}	{hkil}
110	111	111	100	10 $\bar{1}$ 0
200	200	220	002	0002
211	220	311	101	10 $\bar{1}$ 1
220	311	400	102	10 $\bar{1}$ 2
310	222	331	110	11 $\bar{2}$ 0
222	400	422	103	10 $\bar{1}$ 3
321	331	511,333*	200	20 $\bar{2}$ 0
400	420	440	112	11 $\bar{2}$ 2
411,330*	422	531	201	20 $\bar{2}$ 1
420	511,333*	620	004	0004
332	440	533	202	20 $\bar{2}$ 2
422	531	444	104	10 $\bar{1}$ 2
510,431*	600,442*	711,551*	203	20 $\bar{2}$ 3
521	620	642	210	21 $\bar{3}$ 0
440	533	553	211	21 $\bar{3}$ 1

هـ- تطبيقات وتفسير انماط الحيود الإلكتروني من المناطق المختارة:

يتم الحصول على الحيود الإلكتروني من منطقة محددة (مختارة) من النموذج بإدخال فتحة ضوئية صغيرة هي التي تحدد المنطقة التي يحصل منها الحيود الإلكتروني كما في الشكل (7-22).



الشكل (7-22) (a) صورة المجال المضيء (b) نمط حيود من منطقة مختارة. تظهر بصورة خاصة نقطة التقاء الحدود البلورية ، ان نمط الحيود متولد في (b) عن المنطقة (المساحة) X للنموذج الرقيق.

يعكس الحيود الإلكتروني من المناطق المختارة السمات البلورية والكيمائية للعينة في تلك المنطقة حيث يمكن تعيينها بالصورة المباشرة المأخوذة بالمجهر

الإلكتروني النافذ. تسمح تقنية المنطقة المختارة (selected area) ، من بين الميزات الأخرى لها، بعزل الحزم الإلكترونية ومن ثم ظهور (مشاهدة) معلومات الصورة الخاصة بتلك الحزم وعلى شكل صورة المجال المظلم (dark field image) أي أنه يمكن استخدام شعاع محاد واحد وتكوين صورة منه للمنطقة المختارة من العينة.

أما إذا أريد استخدام المجهر بالأسلوب المألوف، أي استخدام الأشعة النافذة فقط لتكوين الصورة حيث تستعمل الفتحة الضوئية عند العدسة الشيئية وبذلك تتكون صورة المجال المضيء (bright field image) للعينة أي أن فتحة العدسة الشيئية سوف تسمح للإلكترونات النافذة بتكوين الصورة وتمنع جميع الإلكترونات المحادة من الاشتراك في تكوين الصورة. يمكن الرجوع إلى الشكل (7-22) حيث يبين باختصار تقنية صورته المجال المضيء لعينة رقيقة بلورية البنية إضافة إلى تقنية الحيود . تظهر المناطق التي يتم حيود الإلكترونات عندها داكنة في صورة المجال المضيء، أما المناطق الأخرى فتظهر شفافة (مضيئة) على فرض أن سمك العينة متجانس.

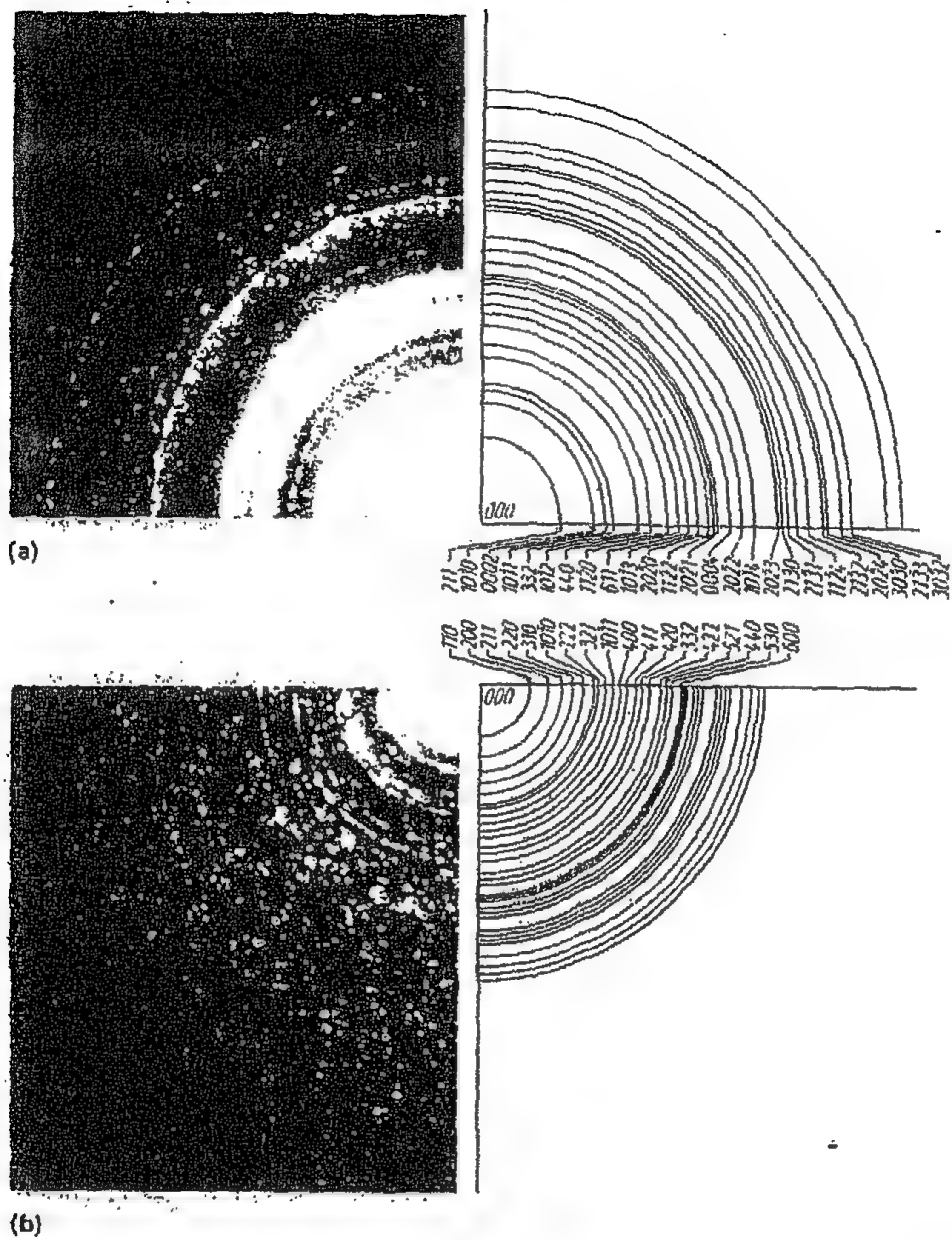
أن قطر الفتحة الضوئية المحددة للمنطقة المراد أخذ الحيود عنها هو الذي يحدد أبعاد المنطقة المعينة التي يتم فيها الحيود ، وعندما يراد استخراج الحيود لمنطقة معينة يتم إدخال الفتحة الضوئية المحددة لمنطقة الحيود ثم تسحب الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية ومن ثم يتم تصغير الصورة وذلك بتقليل التيار المار بالعدسة الوسيطة (intermediate lens) حتى يتم التحويل إلى (الحصول على) نمط الحيود. بهذه العملية يتم تبثير نمط حيود الإلكترونات.

و- التحليل الكيماوي وتحليل البنية بواسطة الحيود الالكتروني من منطقة مختاره:

يمكن تحليل نمط الحيود الالكتروني لقياس البنية البلورية والتكوين الكيماوي اذا علمنا ان نمط الحيود يمثل مساقط الشبيكة البلورية المعكوسة (reciprocal lattice). فيمكن بناء (تصور) الشبيكة البلورية الحقيقية اذا تم التأمل في الهيئات الممكنة للشبيكة المعكوسة العائدة لها ومن ثم يمكن تحديد وحدة الخلية. ويمكن ايضاً من معرفتنا بترتيب الشبيكة البلورية ومناطق خمود الحيود ومن شدات الانعكاس لمختلف المستويات ، التنبؤ بصفات الترتيب الذري وأماكن الذرات في الخلية الأساسية اي التنبؤ بنوع البنية البلورية للعينه.

يجب ان يكون معلوم ان نمط الحيود يمثل مسقطاً واحداً للشبيكة المعكوسة. فإذا اريد اعادة بناء الشبيكة الحقيقية العائدة للشبيكة المعكوسة، فيلزم ذلك دراسة مسقطين او نمطي حيود مختلفين. يتوفر في اغلب المجاهر الالكترونية النافذة التجارية أجهزة لإمالة العينه والحصول على أكثر من نمط حيود للعينه ولنفس المنطقة المحدده و ذلك تسهياً لدراستها بشكل كامل. ان تحليل البنية يتضمن بالأساس دقة قياس عالية نسبياً كما ان فيها مقداراً من التجربة والخطأ (trial and error) عند المحاولة الواحدة لتحديد البنية.

يمكن ايضاح كيفية استخدام حيود الالكترونات في تعيين البنية بالرجوع الى الشكل (23-7). يبين الشكل (23-7) (a) صورة لنمط حيود الكتروني لمنطقة مختارة لغشاء رقيق من عنصر (Er) متأكسداً قليلاً اي في اول مراحل التأكسد. وقد ظهر التحديد (indexing) الكامل لحلقات بعض الانعكاسات العائدة لغير بنية السداسي المتراص (hcp). أما الشكل (b) فيبين النمط المحدد للعنصر بعدما تأكسد تماماً تقريباً وفي نفس منطقة الشكل (a). يلاحظ بصورة واضحة ان الانعكاسات عائدته لبنية المكعب المتمركز الجسم (bcc) وأن ثابت الشبيكة المحسوب هو



الشكل (7-23) تحليل البنية البلورية من حيود الإلكترونات لتحول الأوكسيد من Er_2O_3 إلى Er (a) نمط الحيود للعنصر Er عند بداية التأكسد حيث تظهر عدة انعكاسات ضعيفة لبنية Er_2O_3 (bcc)، (b) نمط حيود Er_2O_3 يبين انعكاسات (bcc) ذو ثابت الشبكية البلورية $a=10.55\text{\AA}$ ، لا تزال أيضاً عدة انعكاسات باقية للعنصر Er (hcp). الفولتية المعجلة 100kV.

(10.55Å) وهذا يحدد ان البنية مماثلة لبنية الاوكسيد ($Er_2 O_3$). لم يُظهر حيود الاشعة السينية لهذه المنطقة اية انعكاسات تشير الى وجود Er_2O_3 وهذا عائد بالدرجة الأساس الى أن الطول الموجي للأشعة السينية (بحدود 1.5 Å بصورة عامة) أكبر بكثير من الطول الموجي للإلكترونات عالية الطاقة، اي ان الاشعة السينية لا تفي بشرط الحيود (قانون براك) هنا. وهذه ميزه أخرى لصالح حيود الالكترونات على حيود الاشعة السينية تضاف الى ميزة اختيار منطقة صغيرة جداً من العينة لأخذ الحيود الالكتروني عنها.

٨-٥-٧ التباين الصوري في المجهر الالكتروني النافذ:

يتم الحصول على التباين الصوري في المجهر الضوئي عادة اما بتباين الامتصاص او بالتباين الطوري. وبالتشابه يمكن الحصول على التباين في المجهر الالكتروني اما بإزالة (ازاحة) الالكترونات من الحزمة وبزاوية استطاره كبيره عند مرورها خلال العينه او بتغيير طور الموجه بمقادير مختلفة عبر جبهة الموجه كنتيجة للإستطاره ذات الزاوية الصغيرة. وهناك نوع آخر من التباين يمكن ان يوجد في حالة المواد البلورية وهو تباين الحيود. ينشأ التباين الاخير لان العيوب والمهايات الصغيرة ذات العلاقة في البنية يمكنها ان تسبب تغييرات موضعيه في شدات الحزم المحاده والنافذة اما تفاصيل انواع التباين فهي:

أ- تباين الامتصاص والتباين الطوري:

لتباين الامتصاص علاقة بالتباين الطوري لان كل منهما ينشأ عن الاستطاره المرنة للإلكترونات في العينه *. واي من التباينين يشارك بصورة أكبر في مجموع

* تتفاعل الحزمة الإلكترونية مع العينه بأسلوبين مختلفين ، فالإلكترونات السريعة تُستطار اما بصورة مرنة وهي الحالة التي لا تفقد فيها الالكترونات جزء من طاقتها خلال عملية الاستطارة او بصورة غير مرنة حيث يمتلك الالكترون المستطار طاقة اقل مما كان يملك قبل الاستطارة وتصبح العينه او بالأحرى ذره واحدة فيها بحالة تهيج.

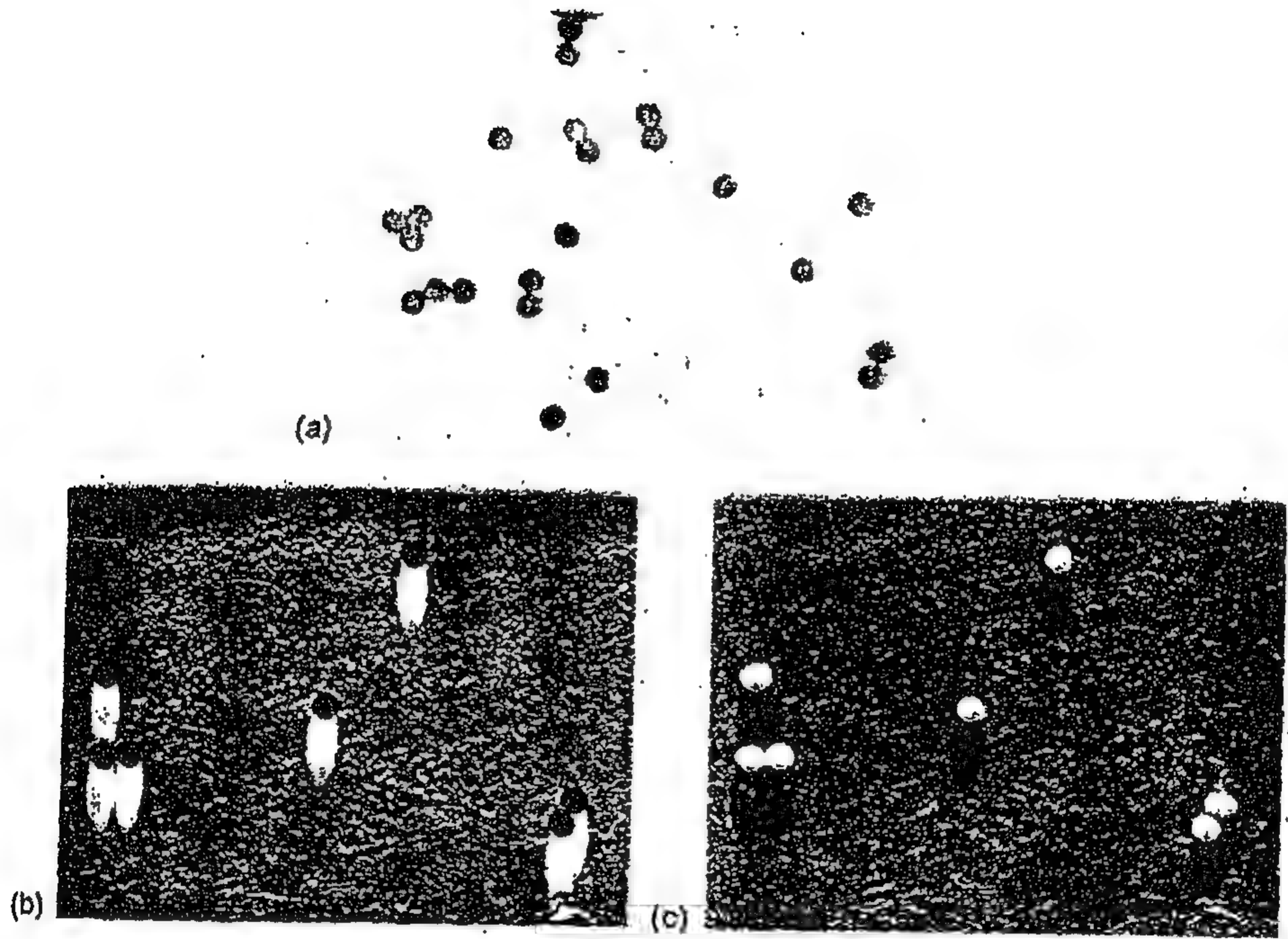
التباين يعتمد على كل من نوعية العينه والظروف التشغيليه للمجهر كقطر الفتحة الضوئية ومقدار عدم التبثر للعدسه الشبئية . ومع انه من المفروض ان يعامل كلا التباينين كحالة واحدة، لكنه من الناحية العملية فإنهما يعتبران تباينين منفصلين الى حد ما.

١- تباين الامتصاص: يعتمد هذا النوع من التباين على الحقيقة القائلة ان الاستطارة (Scattering) المرنة وغير المرنة للإلكترونات السريعة تزداد بزيادة العدد الذري (atomic number) للمادة التي تحدث عملية الاستطارة فيها، وحيث يكون الاعتماد الزاوي لمثل هذه الاستطارة متساوي تقريباً لكل الذرات، فالذرات الثقيلة ستستطير إلكترونات أكثر خارج مدى الزوايا المسموح بها من قبل الفتحة الضوئية للعدسة الشبئية مما تحدثه الذرات الخفيفة. لذلك ستستنزف الاجزاء السميكة من العينه او تلك المتكونه من عناصر ذات عدد ذري عالي، الحزمة الالكترونية النافذة أكثر ونتيجة لذلك ستظهر أكثر عتمة من المناطق الاخرى في الصورة الناتجة.

يعتمد مقدار هذا النوع من التباين الذي يمكن الحصول عليه على الفرق في قدرة الامتصاص (اي الاستطارة) للمناطق المتجاورة في العينه. ويحدد بالدرجة الاساس بالأعداد الذرية للمواد الموجودة فعلاً في العينه وعلى مقدار سمكها. يمكن زيادة هذا النوع من التباين في العينه المتكونه من مواد ذات اعداد ذرية متشابهة بإضافة مادة تعمل استطارة قوية الى أجزاء من العينه دون أخرى. تستخدم مثل هذه التقنيه في حالة تظليل العينه بزاوية معينه كما في حالة زيادة تباين الطبعة الكربونية (car-bon replica)، كما في الشكل (7-24).

٢- التباين الطوري Phase contrast : يحدث تباين الامتصاص بسبب استطارة الالكترونات خارج الفتحة الضوئية للعدسة الشبئية ، وبما أن معظم الاستطارة

المرنه تحصل عند زوايا صغيرة لذا تدخل معظم الالكترونات المستطارة خلال الفتحة الضوئية هذه . وحيث ان هذه الالكترونات تعاني تغيراً في طور الموجه المغادرة للسطح الاسفل من العينه بدلاً من التغير في السعة الحقيقية لها. فشدة الموجه ستكون متساوية في جميع المناطق ومن ثم فالتصوير المباشر للعينه لا يحدث (لا يكون) تبايناً.

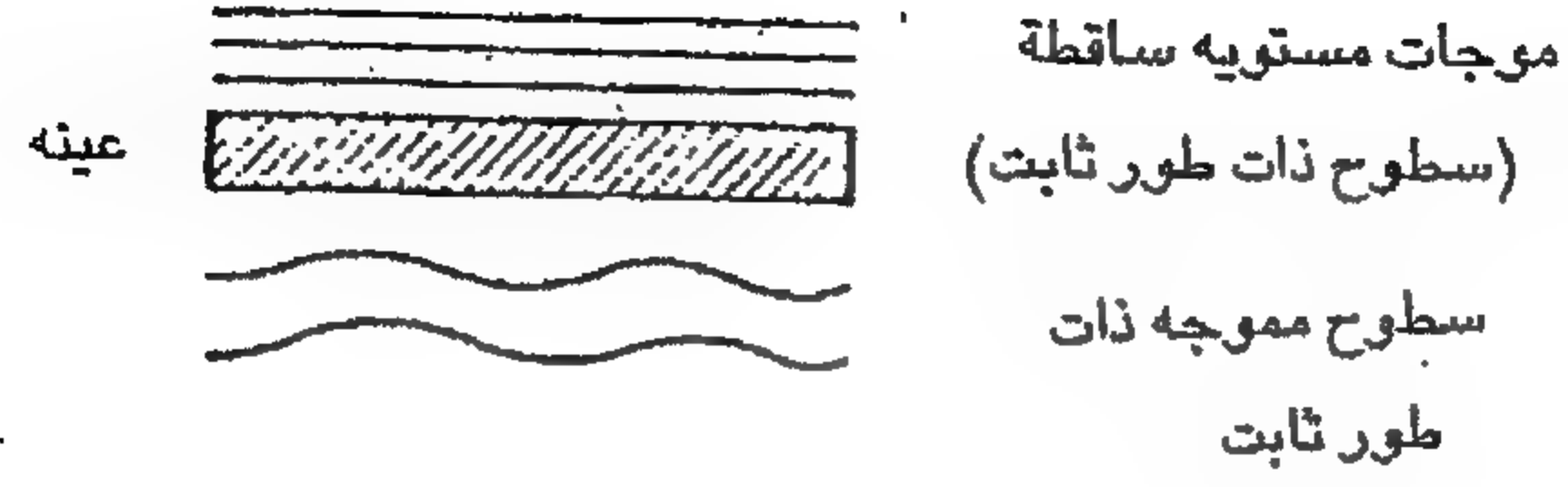


الشكل (7-24) صورة بالمجهر الالكتروني لكريات اللاتكس ($0.3\mu\text{m}$ latex) على غشاء من الكربون (a) كما حضر، تبدو الكريات كأنها اقراص ولم يظهر أثر لبنية الغشاء الكربوني (b) صورة لنفس النموذج السابق لكنه مظلل يظهر بوضوح تعزيز تباين الكريات وكذلك تباين سطح غشاء الكربون (c) تبدو طبعة الحالة (b) مع تباين معكوس حيث تبدو مناطق الظل سوداء وتبرز ظاهرة الابعاد الثلاثة (التجسيم).

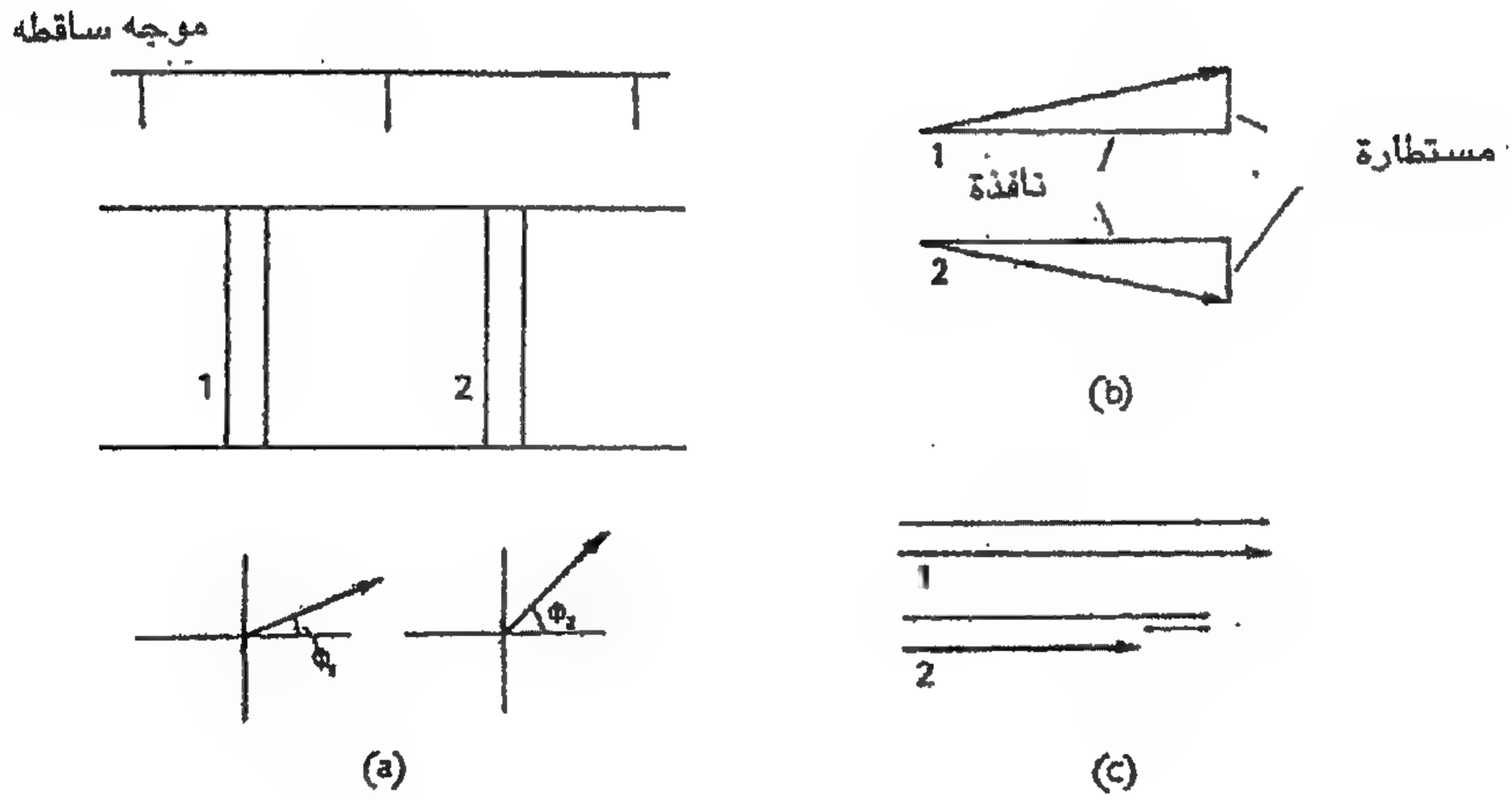
يكون تأثير التباين الطوري مهم عند محاولة تمييز تفاصيل ماهيات في صوره ابعادها أصغر أو تساوي 10 إلى 15\AA . وينخفض تأثير التباين الطوري بشكل تدريجي ثابت فوق حد التمييز هذا . ولأجل ان يكون دور التباين الطوري فاعلاً يجب ان يمر كل أو بعض من الالكترونات المستطارة خلال فتحة العدسة الشيئية ومن ثم تتحد ثانية مع الالكترونات غير المستطارة لتكوين الاختلافات في الشدة من نقطة الى أخرى في الصورة.

ولو فرضنا أن حزمة من الالكترونات المتوازية والتي لها نفس الطول الموجي ونفس الطور سقطت على نموذج رقيق جداً (أقل من 30\AA). فإن اغلب هذه الالكترونات سينفذ خلال النموذج إلا أن قسم منها سيمر قريباً جداً من الذرات وينحرف بزاوية تعتمد على كل من العدد الذري وعلى مقدار مسافة الاقتراب. تخرج الالكترونات من النموذج بسعة منتظمة الا أن لها أطوار مختلفة عند السطح المستوي ، وذلك بسبب الفروق في الطور المتولده عن عمليات الاستطارة هذه ، اي ان هناك سطح متعرج للطور الثابت كما في شكل (7-25) .

ولتقدير الانحرافات في الطور المتولدة من مرور الالكترونات خلال النموذج. فلنتصور ان شريحة رقيقة من مادة النموذج عمودية على الحزمة الالكترونية الساقطة كما في الشكل (7-26) فتكون الموجه المستويه (التي لها طور وسعة phase and amplitude) ثابتين ساقطة على الشريحة الرقيقة (النموذج) فمعدل الجهد في العمود رقم (1) يختلف عن الجهد في العمود رقم (2) ومع ان الموجه الخارجه من السطح الأسفل للنموذج تمتلك نفس السعة في كل جزء منها إلا أن لها طور مختلف فلها الطور Φ_1 تحت العمود 1 والطور Φ_2 عند العمود 2 ، وقد تم توضيح ذلك في مخطط الطور المرسوم في (a) أسفل الطبقة السطحية. يمكن ان يعتبر مجموع الموجه هو الموجه النافذة متحدة مع موجات مستطاره ضعيفة نسبياً والتي تكون اطوارها مختلفة عن طور الموجه النافذة بمقدار $\frac{\pi}{2}$. وكلما تغيرت سعة مركبة



الشكل (25-7) رسم تخطيطي يبين كيفية نشوء الفروق في الطور عند اختراق نموذج رقيق.



الشكل (26-7) موجة مستوية (ذات سعة وطور ثابتين) ساقطة على طبقة رقيقة.

الموجه المستطارة يتغير تبعاً لذلك طور الموجه الكلية، كما في الشكل (b). ان تغير طور المركبة المستطارة بمقدار $\pi (n + \frac{1}{2})$ ، n هو عدد صحيح، يؤدي الى تغير في السعة ومن ثم تغير في الشدة. لأن الشدة (I) تتناسب طردياً مع مربع السعة (A) اي ان $I \propto A^2$ ، (الشكل c).

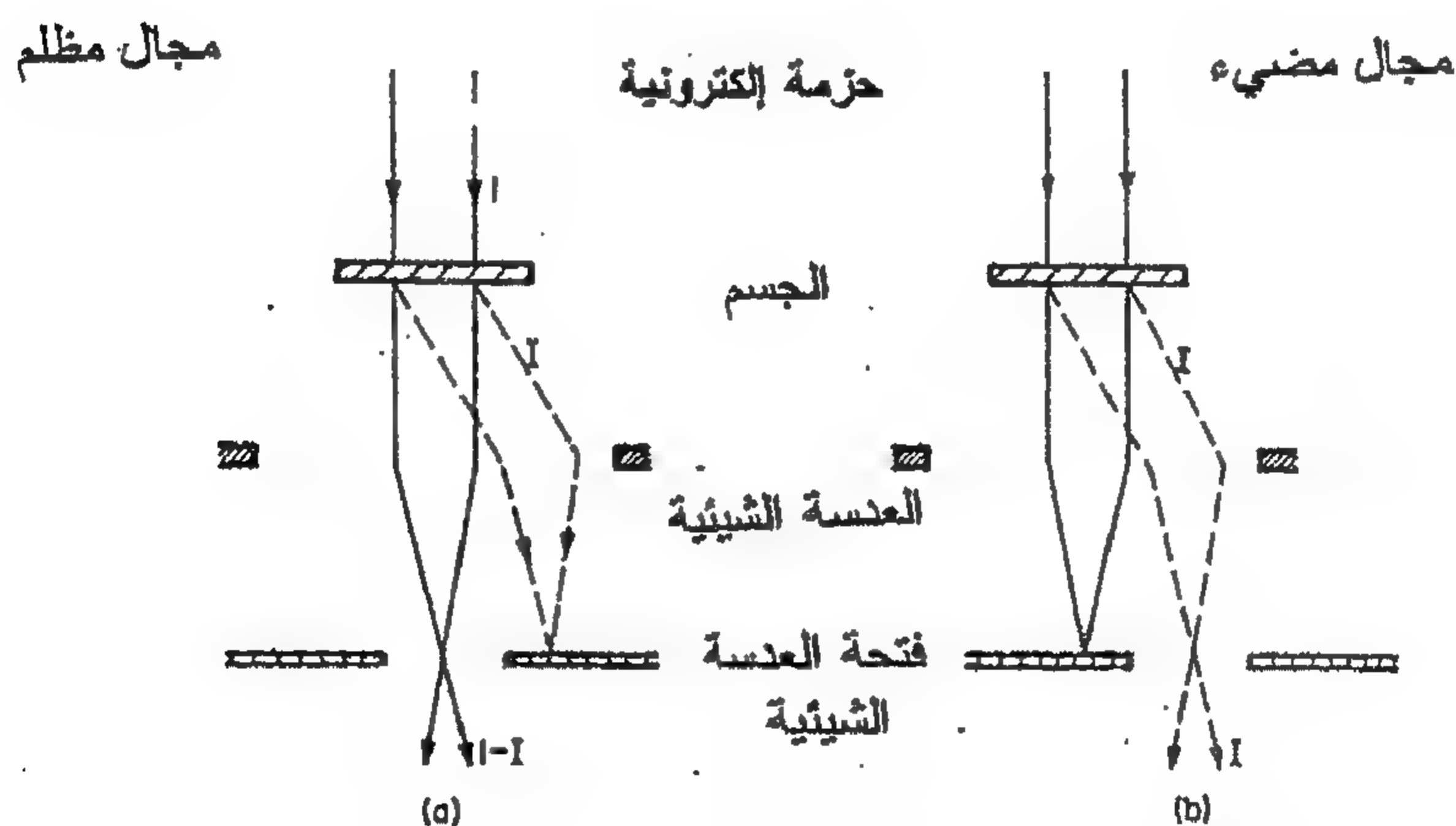
ب- تباين الحيود Diffraction contrast :

هناك عدة أنواع من البنى البلورية للمواد الصلبة لا تظهر تبايناً عالياً باستخدام الطريقتين آنفتي الذكر (التباين الطوري وتباين الامتصاص) . فلا تبدي الانخلاعات، على سبيل المثال، تباين امتصاصي، بينما يمكن للانخلاعات ان ترى اذا امكن تمييز مستويات الشبكة البلورية، حيث يتطلب ذلك نموذجاً رقيقاً بحيث ان معظم الانخلاعات الموجودة اصلاً تنزلق خارجة من النموذج خلال سطحه. ان مثل هذه العيوب (الانخلاعات) مع ذلك، يمكن ان يتم اظهارها في العينات السميكة نسبياً باستخدام حقيقة كون هذه العيوب تشوه مستويات الشبكة البلورية موضعياً ومن ثم تغير الشدة التي تحيد بها هذه المستويات الموجه الالكترونية الساقطة.

يتم هذا التباين بالسماح للحزمة الالكترونية النافذة او احدى الحزم المحادة للمرور خلال الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية ومن ثم لتكوّن الصورة. ولو فرضنا ان هناك منطقة في العينة تكون فيها مستويات الشبكة البلورية منحنية (معوّجة) وبذلك تزداد الشدة المحادة موضعياً (عند تحقق قانون براك) وستظهر المنطقة المشوّهة موضعياً من العينة في الصورة المتكونة باستخدام الشعاع المحاد مضيئة مقارنة مع المساحات المجاورة. والعكس صحيح، عند استخدام الحزمة النافذة، حيث ان الحزمة النافذة سوف تفقد موضعياً الكترونات اكثر بسبب الحيود وستظهر تلك المنطقة مظلمة في ارضية مضيئة (صورة المجال المضيء). ان عرض صورة العيب المتكون بهذا الاسلوب يعتمد على مقدار تشويه تلك المنطقة في النموذج ويقدر

كشياء نموذجي بحوالي 10nm . لذلك لا يشترط ان تكون قدرة تمييز الجهاز المطلوبه عالية جداً ومن ثم يمكن فحص عينات سمكها عدة مئات من النانومترات وبنجاح .

ومما تقدم يفهم ان هناك نوعين من الصور، كما سبق التنويه عنه بصوره مختصرة فعند السماح للحزمة الالكترونية النافذة فقط بالمرور من الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية فعندها تسمى الصورة المجال المضيء حيث تظهر فيها الدقائق المترسبة والعيوب على المستوى الذري (أمثال الانخلاعات وغيرها) أو حتى الحبيبات وأشباه الحبيبات (subgrains) (إذا كانت بالإتجاه الصحيح) مظلمة وبقيّة المناطق مضيئة . أما عند السماح لأحد الحزم الالكترونية المحاده بالمرور خلال الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية فستظهر المناطق او العيوب التي سببت حيود تلك الحزمة مضيئة وبقيّة المناطق مظلمة لذلك تسمى صور المجال المظلم اي ان كل المناطق تبدو مظلمة عدا التي يكون ذلك الشعاع المحاد منها، الشكل (27-7) .



الشكل (27-7) مخططاً الأشعة يوضحان (a) صورة المجال المضيء و (b) صورة المجال المظلم في المجهر الإلكتروني. يتكون نمط الحيود في مستوي الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية ففي حالة صورة المجال المضيء تمنع الفتحة الضوئية الاشعة المحادة من الاشتراك في تكوين الصورة.

وهناك عدة انواع من تباين الحيود الى جانب ماتم ذكره وهي تباين الاهداب من الحدود البلورية والعيوب...ويمكن تمييز الآتي منها:

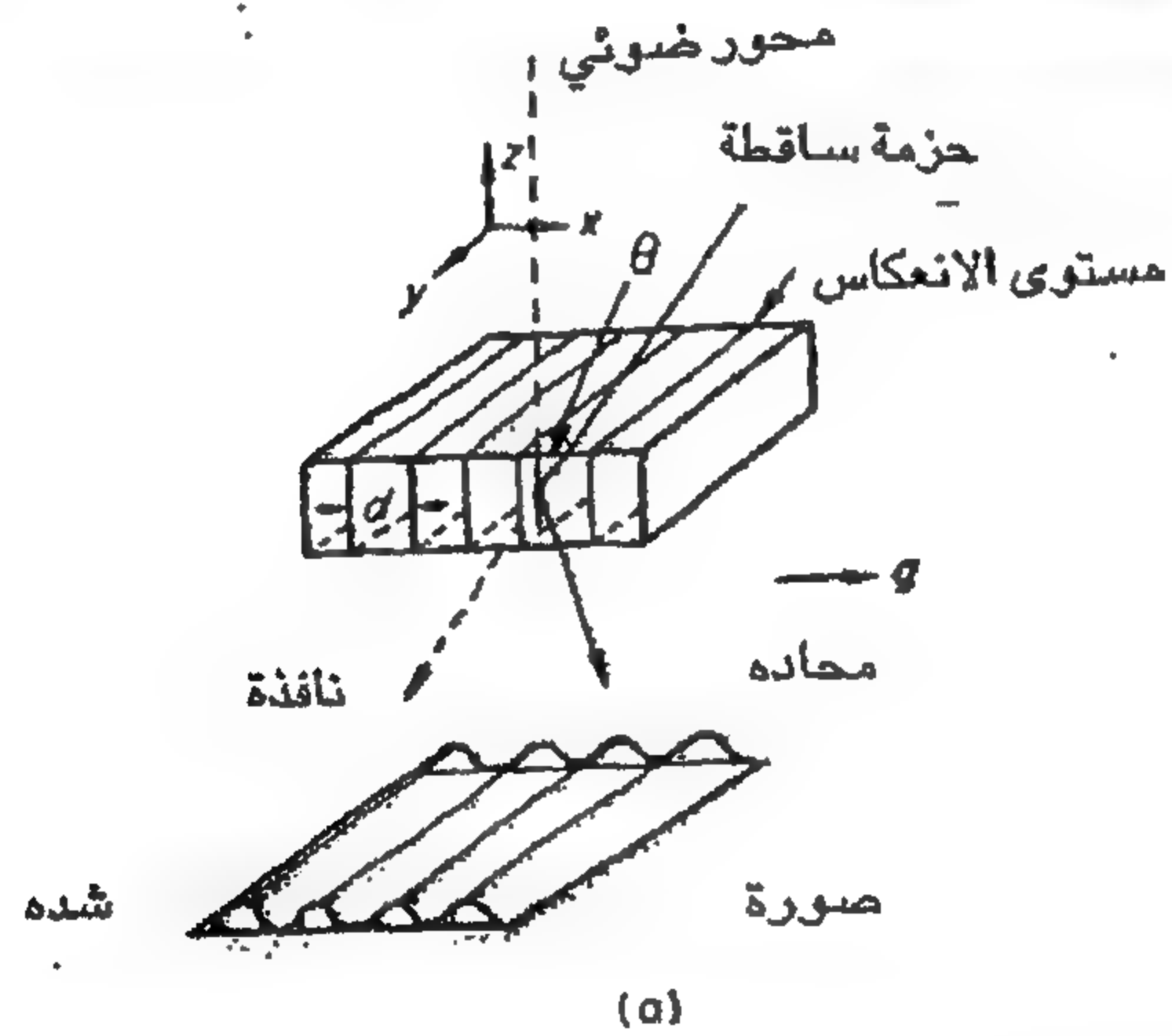
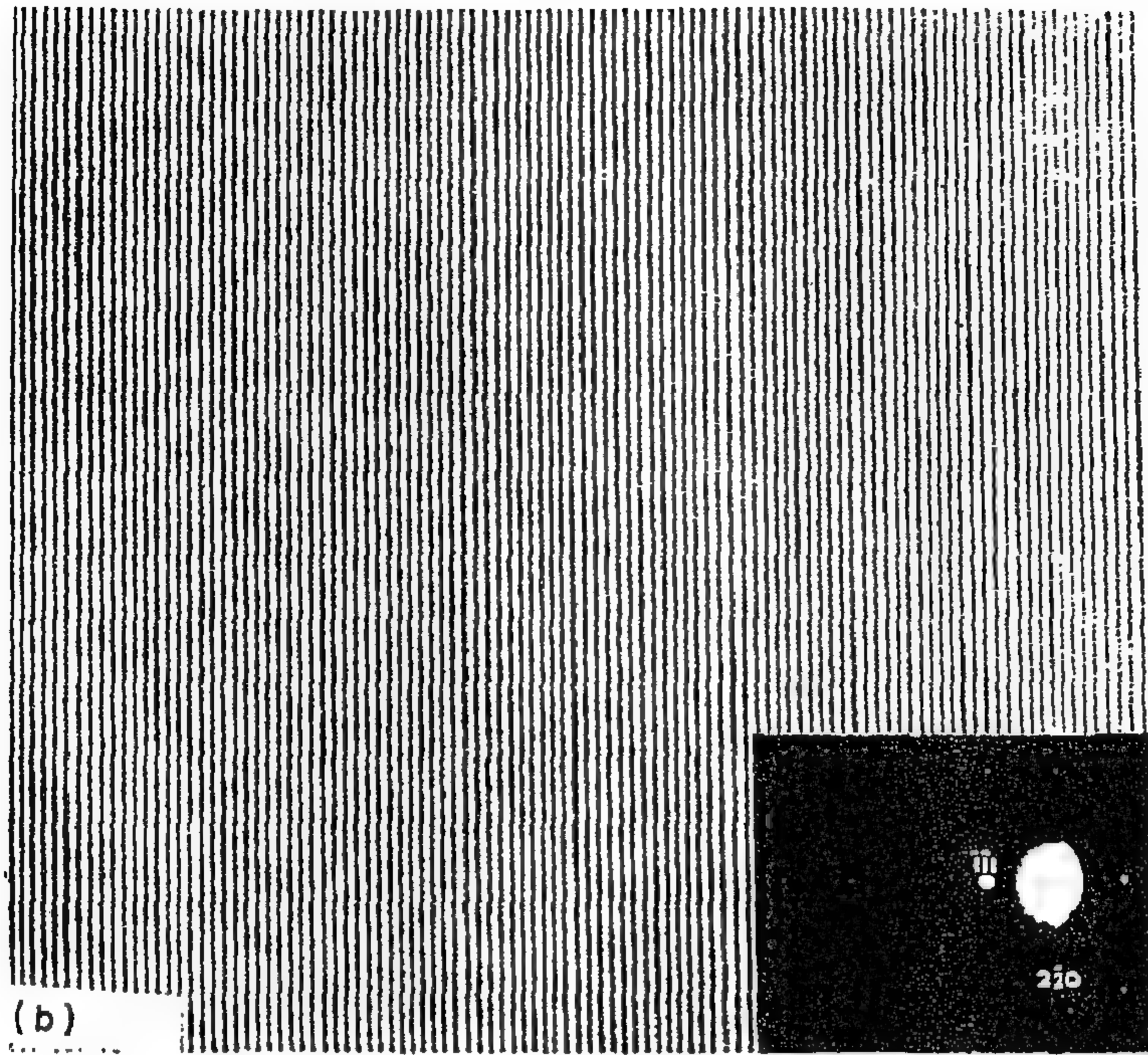
١- تمييز مستويات الشبكة البلورية (صورة حزمتين او ثلاث حزم). لتمييز مستويات الشبكة البلورية للنموذج يتم السماح لواحد او اثنتين من الحزم المحادة إضافة الى الحزمة الأساسية النافذة لتكوين الصورة.

تتولد صورة اهداب متعاقبة كنتيجة للتداخل الطوري بين هذه الحزم. و تحت ظروف معينة تكون المسافات بين الاهداب (fringes) في الصورة متعلقة بالمسافة بين مستويات الانعكاس الذرية التي تولد الحزمة المحادة المتحدة مع الحزمة النافذة لتكوين الصورة.

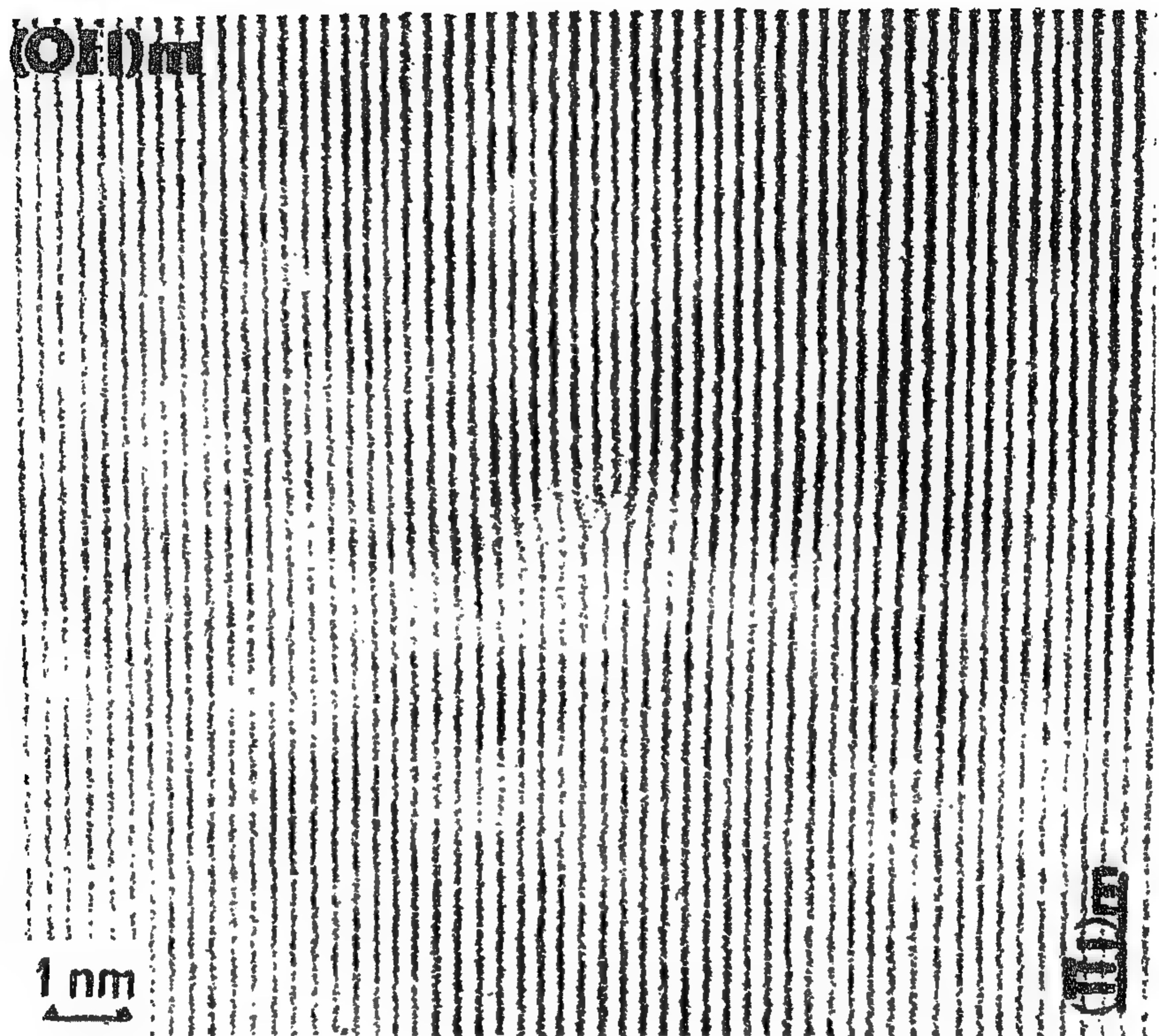
ان أبسط نوع من هذه الاهداب هي تلك المعروفة بأهداب الشبكة البلورية والتي يتم الحصول عليها من بلورة مداره قريباً من اتجاه الانعكاس (reflecting orientation) عندما تكون فتحة العدسة الشبكية موضوعه بشكل يسمح لكل من الحزمة النافذة مباشرة والحزمة المحادة لتمر منها وتكوّن الصورة كما في الشكل (7-28). وحيث ان هذه الأهداب لا تُرى الا عندما تكون العينه خفيفة جداً، فيمكن في هذه الحالة اهمال الامتصاص.

أما إذا تضمنت البلوره عيوب ، على سبيل المثال انخلاعه طرفيه (edge dislocation) والتي يغير وجودها الانتظام الموجود في المستويات الذرية للبلوره، فهذه الانخلاعه ستظهر في الاهداب ايضاً الشكل (7-29).

لذلك فالحصول على هذه الاهداب يشير غالباً الى القدرة على تمييز المستويات الذرية للشبكة البلورية، مع أن الاهداب ليست، بشكل عام ، متطابقة مع حافات مستويات الحيود.



الشكل (28-7) في (a) رسم تخطيطي يوضح الشدة في الصورة بموازاة مستويات الانعكاس عند اتحاد كل من الحزمة النافذة والحزمة المحادة لتكوين الصورة. (b) صورته للمستويات الذرية (111) في بلورة السليكون، المسافة بين الاهداب 3.138\AA ، عند استخدام الاضاءة المائلة.



الشكل (7-29) صورة المستويات الذرية (111) لشبكة بلورة السليكون وتظهر فيها انخلاعه طرفيه. متجه بيرجرس (b) لها هو $\frac{1}{2} [10\bar{1}]$ أو $\frac{1}{2} [110]$.

٢- أهداب الحدود البلورية، تتولد أهداب بطريقة مشابهة لما تمت الإشارة إليه أعلاه بسبب تواجد مختلف العيوب أو الحدود. فبالنسبة لأهداب الحدود البلورية، وعندما يكون الحد البلوري مائلاً واحدى البلورتين عند اتجاه الانعكاس المضبوط (حسب معادلة براك) فإن الإلكترونات المارة يتم تمثيلها باتحاد موجتين ومن ثم حدوث تداخل بينهما وتكوين الأهداب، الشكل (7-30). ويحدث الشيء نفسه عند حافة العينه أو عند وجود أشباه الحدود بين أشباه الحبيبات.

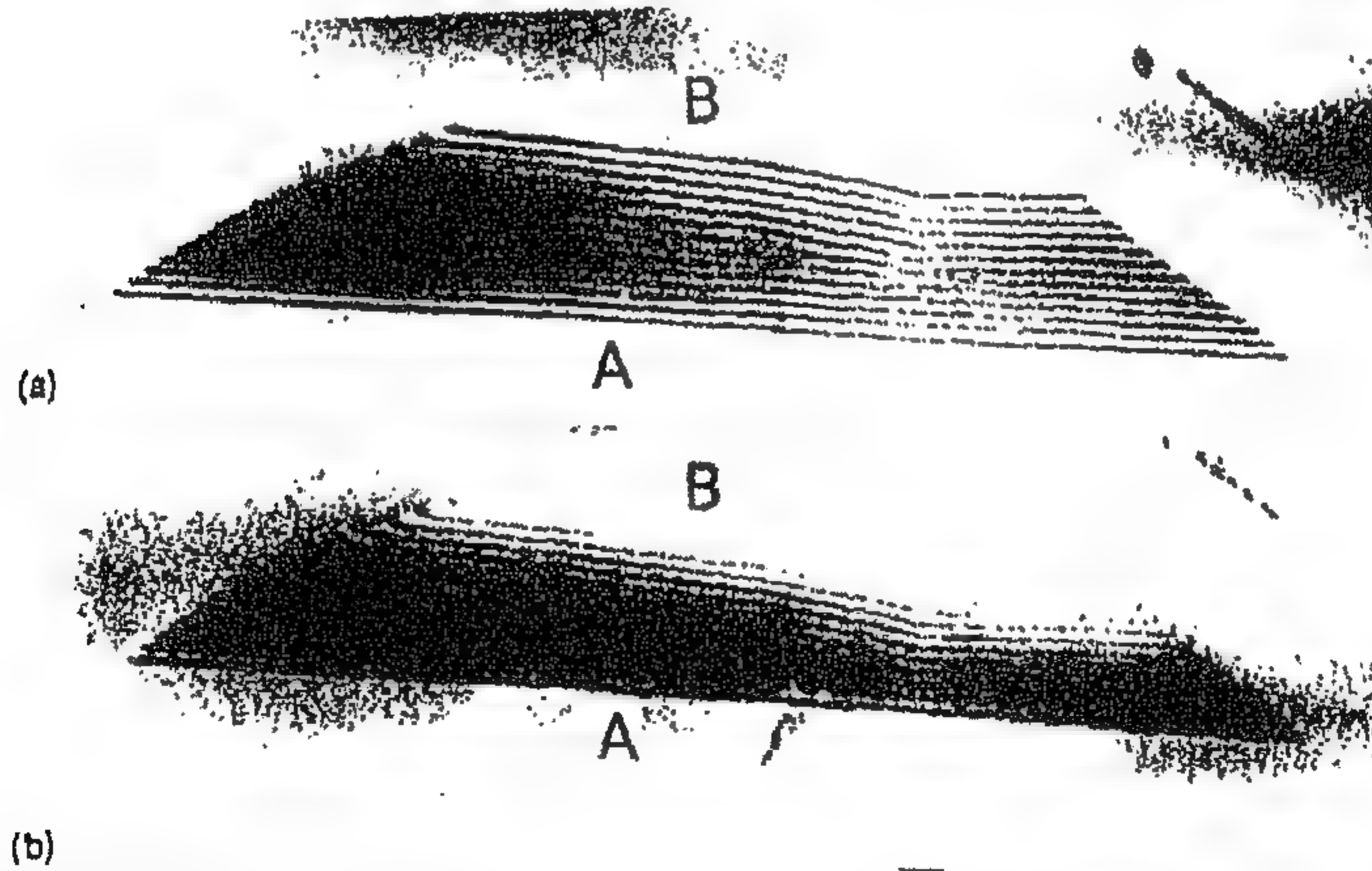


الشكل (7-30) (a) صورة المجال المضيء لرقاقه بشكل اسفين (wedge - shaped) تحتوي على حد بلوري. حدثت أهداب السمك في الحبيبة A والتي هي قريبة من اتجاه الانعكاس، وهي تتوافق مع الأهداب عند الحد البلوري في C (b) هي صورة المجال المظلم لنفس المنطقة في (a) تبدو الحبيبة B سوداء لتعني انها لم تعمل حيود.

٣- أهداب خلل النسق (Stacking fault fringes)، عندما تحتوي البلورة على خلل في نسق تراكم المستويات البلورية فإن الشبيكة تنزاح على أحد جانبي الخلل بمقدار ثابت نسبة الى الشبيكة على الجانب الآخر، بحيث ان اتجاه البلوره على اي من جانبي الخلل يبقى على حاله. يتواجد خلل النسق في المستويات البلورية ذات

الادلة المنخفضة (Low - indices) ولذلك فهو خلل سطحي مالم تتضمن المستويات عيوب اخرى كالانخلاعات الجزئية. فعلى سبيل المثال، فإن خلل النسق في المعادن ذات بنية المكعب المتمركز الوجه (fcc) كالنحاس او الفضة يحدث عندما يكون نسق تراكم المستويات البلورية فيها غير صحيح (يكون تراكم المستويات الاكثر تراساً (111) في بنية هذه البلورات على الاسلوب الموصوف في كتب علم البلورات وهو ABCABCABC). يمكن ان ينشأ مثل هذا الخلل، اذا كان موضعياً، عند ازالة او زيادة أحد المستويات الذرية، كما يحدث عند تجمع الفراغات (vacancies) او الذرات البينية على او بين المستويات الاكثر تراساً. فإذا ازيل المستوى B، في الوسط، من النسق آنف الذكر فيصبح النسق ذو خلل حيث يكون كالاتي $AB|CACA|BC$ اي تكون منطقة الخلل هي سداسي متراس (hcp) (لأن نسق مستوياته هو CACACA) والمناطق المجاورة لها مكعب متمركز الوجه (fcc).

يمكن مشاهدة مثل هذا الخلل، الذي يميل عن مستوى العينه، في المجهر في كل من صورتين المجال المضيء والمجال المظلم وباستخدام انعكاس براك الملائم. يظهر الخلل بتباين يتألق من أهذاب موازية لخطوط تقاطع هذا الخلل مع سطحي النموذج. يبدو خلل النسق في صورة المجهر الالكتروني وباسلوب المجال المضيء والمجال المظلم كما في الشكل (31-7).



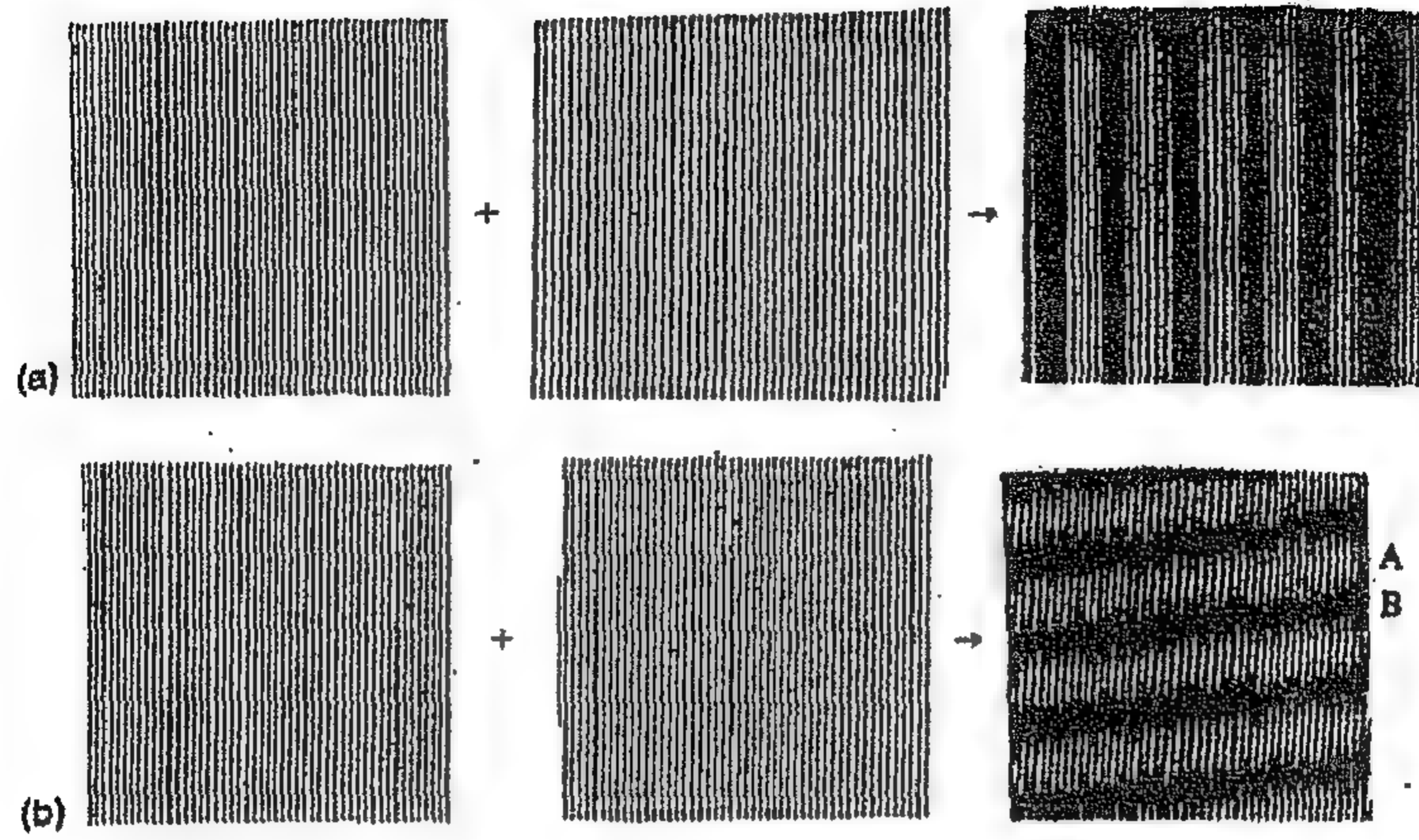
الشكل (31-7) (a) صورة المجال المضيء و (b) صورة المجال المظلم لخلل النسق في كاربيد الفناديوم (VC) تكون الاهذب متشابهة عند تلاقي الخلل مع السطح العلوي في A ومكملته عند B.

تتكون صورة مشابهة لما في الشكل (7-31) في حالة احتواء البلوره على التوئمه (twinning).

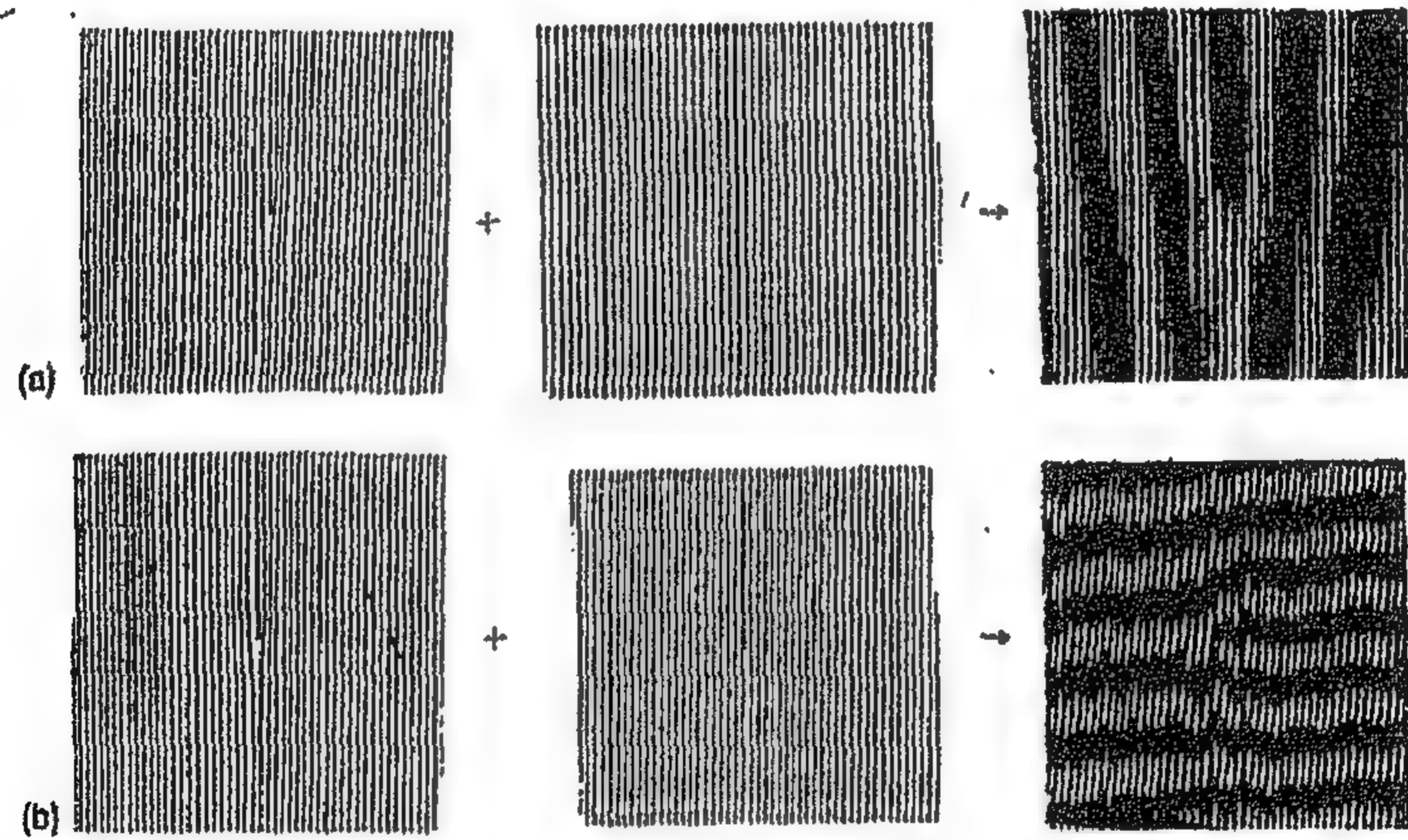
٤- أهداب موارده "Moire fringes"، وهي الاهداب التي تتكون نتيجة لتراكب مجموعتين من الخطوط المتوازية بأسلوب يوضحه الشكل (7-32). تكون مجموعتا الخطوط موازية لبعضهما البعض، في احدى الحالتين إلا أن المسافة البينية لأحدى المجموعتين تختلف قليلاً عن الأخرى بينما تكون المسافة البينية في الحالة الثانية متساوية للمجموعتين إلا أن احدى المجموعتين تميل عن الأخرى قليلاً. تتكون الاهداب أيضاً عند ضم هذين النوعين من عدم التوافق (mismatch) الى بعضهما.

وهكذا يمكن أن تتولد اهداب موارده في المجهر الالكتروني اذا تراكبت بلورتان لهما مستويات انعكاس بحيث تُرى مساقطها كأنها مجموعتين من خطوط متوازية كما في الشكل (7-32). بحيث أما أن تكون مستوياتهما متوازية والمسافة البينية لهما متساوية تقريباً (لكنها تختلف) أو متساوية المسافة البينية إلا أنهما مائلتين قليلاً بالنسبة لبعضهما. تحدث الاهداب، بالإضافة الى ذلك، عندما يكون هناك ميل قليل والمسافة البينية متساوية تقريباً (لكنها تختلف).

وعند فرض أن احدى البلورتين فيها انخلاعه طرفيه (أو لولبيه) وأن مستوياتهما متوازية تماماً والمسافة البينية فيهما متساوية تقريباً فيكون نموذج الاهداب كما في الشكل (7-33) (a) ويكون شكل الاهداب كما في الشكل (b) عندما يكون بين مستويات البلورتين ميل قليل.



الشكل (7-32) تكوين اهداب موارده بواسطة مجموعتين متراكبتين من الخطوط (a) متوازية لكنه مختلفة في المسافة البينية بينهما (b) متساوية في المسافة البينية لكن أحدهما مائلة بالنسبة للآخرى.



الشكل (7-33) تكوين اهداب موارده بتراكب شبكتين احدهما تحتوي على انخلاء طرفيه (a) المستويات متوازية لكن لهما مسافتين بينيتين مختلفتين (b) المسافتان البينيتان متساويتان لكن المستويات مائلة بالنسبة لكل منهما.

يمكن فهم تكوّن نمط (أهداب) موارده في صورة المجهر الإلكتروني بوساطة تأثير تراكب بلورتين على نمط حيود الإلكترونات. فتكوّن البلورة الأولى مجموعه من الحزم المحادة والتي تعتبر كحزم ساقطة عندما تدخل إلى البلورة الثانية. يتكوّن نمط الحيود النهائي من نمط الحيود لكل بلوره على انفراد اضافة الى الانعكاسات المتولدة من آلية الحيود المزدوج. فإذا كانت البلورتان مائلتان قليلاً عن بعضهما بحيث يولد الحيود المزدوج حزمة موازية تقريباً إلى الشعاع الساقط، ويمر خلال الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية المستخدمة. فتتولد أهداب موارده من اتحاد حزمة الحيود المزدوج مع الحزمة الأساسية غير المحادة. تظهر أهداب موارده في الصورة اعتماداً على قدرة تمييز المجهر نفسه. تكون المسافة البينية لأهداب موارده (D) مساوية للمسافة الخاصة بالبعد الفاصل بين حزم الحيود المزدوج في نمط الحيود. إذا كانت d_1 و d_2 تمثلان المسافة البينية لمستويات البلورتين اللتين تكوّنان أهداب موارده و D هي المسافة البينية لأهداب موارده فتكون

$$D = \frac{d_1 d_2}{|d_2 - d_1|} \quad \dots\dots\dots (26-7)$$

للأنماط المتوازية. كما أن

$$D = \frac{d}{\Phi} \quad \dots\dots\dots (27-7)$$

للأنماط المتماثلة والمائلة بزاوية Φ (أي عند كون $d = d_1 = d_2$). وان

$$D = \frac{d_1 d_2}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 - d_1 d_2 \cos \Phi}} \quad \dots\dots\dots (28-7)$$

للأنماط غير المتماثلة (أي عند كون $d_1 \neq d_2$) والمائلة بزاوية Φ .

يمكن اعتبار نمط موارده كصوره مكبره للشبيكة البلورية لاحدى البلورتين المكوّنه للنمط. لذا يُعرّف تكبير موارده (M) بالآتي:

$$M = \frac{d_2}{|d_2 - d_1|} \quad \dots\dots\dots (29-7)$$

٧-٥-٩ أسلوب تكوين الصور وتسجيلها وأنواعها:

يمكن تسجيل أكثر من نوع من أنواع الصور حيث تكمل معلومات كل نوع النوع الآخر وبالتالي تكتمل المعلومات الخاصة بالنموذج المفحوص. وقد تم التطرق الى انواع هذه الصور سابقاً لكنه نظراً لأهمية الموضوع سنستعرضها تباعاً.

أ- صور المجال المضيء (B.F.I. (Bright field image, ويتم الحصول عليها بإدخال الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية وجعلها في مكان بحيث تسمح للإلكترونات النافذة، التي باتجاه الحزمة الساقطة ، فقط بالمرور خلالها لتكوّن الصورة اي ان الفتحة تمنع كل الإلكترونات المحادة من الاشتراك في تكوين الصورة. فالصورة الناتجة تسمى بصورة المجال المضيء اي ان الاجزاء التي تحيد الإلكترونات تبدو داكنة في حين تبدو بقية اجزاء الصورة مضيئة ومعنى هذا ان اساس الصورة مضيء وفيها مناطق داكنة. و كذلك إذا تم امتصاص الإلكترونات من قبل المناطق السميكة او ذات العدد الذري الأكبر او الترسيبات فتظهر داكنة ايضاً بسبب عدم امكانية الإلكترونات من النفوذ خلالها. ويتحقق مثل هذا النوع من الصور في المواد البلورية وغير البلورية.

ب- صورة المجال المظلم (D.F.I. (Dark field image ويتم تحقيق مثل هذا النوع من الصور بالسماح لأحد الحزم الإلكترونية المحادة فقط لتكوين الصورة. ويتحقق ذلك عملياً اما بتحريك الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية حتى تدخل الحزمة المحادة المطلوبة خلالها. أو بإمالة الحزم الإلكترونية (تتوفر هذه التسهيلات في المجاهر الإلكترونية النافذة الحديثة) حتى تدخل الحزمة المحادة خلال الفتحة الضوئية لتكوين الصورة. وعندها تكون الصورة ذات ارضية داكنة ماعدا لاجزاء التي تحيد تلك الحزمة المحادة فتبدو مضيئة. ومن هنا يتضح انه يمكن تكوين عدة صور مجال مظلم كل واحدة خاصة بإحدى الحزم المحادة، ويتحقق هذا النوع من الصور في المواد البلورية فقط.

ج- صورة المستويات الذرية المباشرة، بما أن الذرات مرتبة في المواد البلورية بمستويات معينة تسمى بالمستويات الذرية، فيمكن تصوير مساقطها ومن ثم قياس المسافات البينية لها مباشرة من الصور. وللحصول على هذا النوع من الصور، أولاً يجب أن يكون النموذج رقيقاً جداً وثانياً يجب أن يمتلك المجهر الإلكتروني قدره عالية للتمييز وأخيراً تحريك الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية بحيث تسمح بمرور الحزمة الإلكترونية النافذة وأحدى الحزم المحادة. وبنتيجة التداخل بين الحزمتين تظهر مساقط المستويات البلورية الخاصة بتلك الحزمة على شكل اهداب.

د- صور حيود الإلكترونات من مناطق مختارة، يبين الشكل (7-22) كيفية تكوين صور حيود الإلكترونات والفرق بينهما وبين صورة المجال المضيء يستخدم هذا النوع من الصور لدراسة البنى البلورية للمواد وللتمييز بين المادة البلورية وغير البلورية كما يتم استخدامها للتمييز بين المادة احادية البلوره ومتعددة البلورات او بين المادة ذات البلورات الصغيرة والخشنة او للتمييز بين الاطوار الموجودة وتحديدتها الى آخر ذلك من المجالات. يمكن ان يتم تسجيل الصورة بواحد أو أكثر من الوسائل التالية:

- ١- على الشاشة المتألقه او
- ٢- على الكاميرا ذات الاقلام المستوية (flat) المنفصلة أو
- ٣- على الكاميرا ذات الفلم المتصل الذي عرضه 35mm أو
- ٤- على كاميرات البلورويد والتي تظهر الصورة مباشرة ولا يوجد في هذه الحالة فلم سالب (negative).
- ٥- على شاشة عرض (monitor).
- ٦- وأخيراً الكاميرا العددية (digital camera) والتي بواسطتها يمكن ان تخزن الصور على الاقراص المرنة (floppy disks) مثلاً.

١٠-٥-٧ اختيار مقدار الفولتية المعجلة:

تستخدم الفولتية الواطئة نسبياً للمواد اللينة والعضوية كما يحبذ في هذه الحالة استخدام الاصبع البارد (يتوفر في المجاهر الحديثة) للحفاظ على بنية المادة من التغيير بسبب الحرارة المتولدة عن الحزمة الالكترونية . أما مقدار هذه الفولتية فتتراوح بين 20 الى 60 kV . أما عند فحص مواد صلبة او عالية الوزن الذري والكثافة فتستخدم اعلى ما يمكن من فولتية متوفره في المجهر وتكون بحدود 80 الى 125 kV وهذا هو المتوفر في المجهر الالكتروني النافذ الاعتيادي. اما في حالة المجهر الإلكتروني النافذ عالي الفولتية، فقد تصل الفولتية المعجلة فيه الى 2MV ($2 \times 10^6 V$) وهذا النوع من المجاهر يستخدم لفحص النماذج السميكة نسبياً، وهو خارج عن مجال كتابنا الحالي.

١١-٥-٧ طرائق تحضير العينات للمجهر الإلكتروني النافذ:

توجد طرائق عديدة لتحضير عينات ملائمة للمجهر الإلكتروني النافذ.

تتضمن أغلب الطرائق اما تحضير العينة مباشرة على شكل غشاء رقيق (thin film) او تخفيف سمك قطعة المادة المراد فحصها حتى تصبح بعض مناطقها رقيقة بحيث يمكن ان تخترقها الالكترونات . وقبل ان نوجز بعض التقنيات الاكثر أهمية يمكن القول ان المعادن وبعض المواد العضوية هي الأسهل التي يمكن تحضير عينات للمجهر من الكتل الكبيره منها. وفي الحقيقة فإن أي مادة مستقرة نسبياً يمكن تحضير عينه منها باستخدام احدى الطرائق التي سوف تذكر . لقد تمت دراسة المواد المختلفة الخواص بالمجهر الإلكتروني كالخرسانه (Concrete) والزجاج والمعادن واللدائن (plastics) وخامات المعادن والألياف الكربونية إضافة الى الانسجة الحيوانية والنباتية.

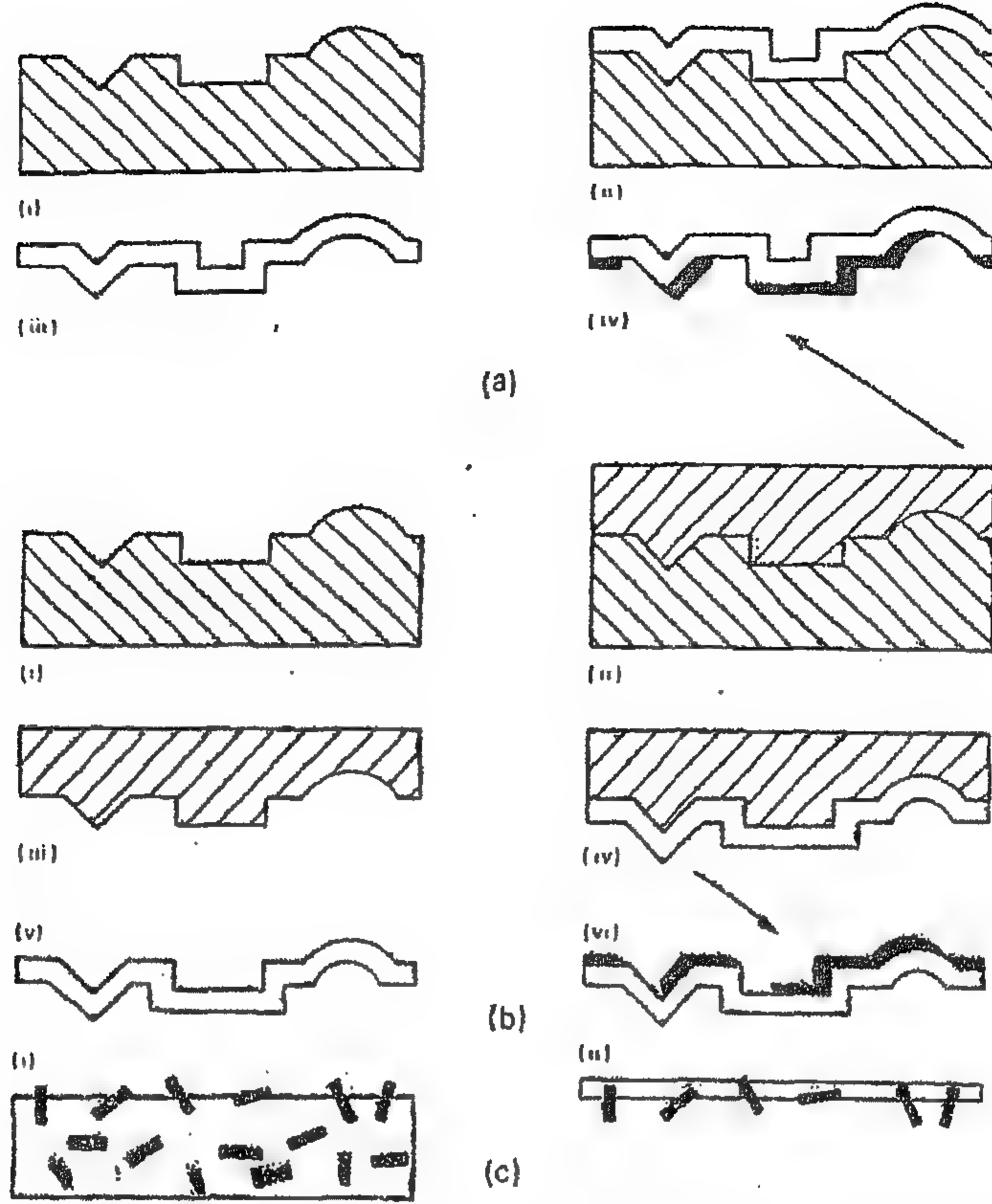
١- الطريقة المباشرة لتكوين الاغشية الرقيقة.

أ- بالتبخير: وفيها تسخن كمية قليلة من المادة في جو مفرغ (تحت ضغط افضل

من 10^{-4} torr) بحيث تتبخر . يتم تحقيق هذه الطريقة بمختلف التقنيات فأما ان يمرر تيار بسلك من المادة المراد تبخيرها او يتم طلاء المادة على شعيره تسخن بامرار التيار فيها او ان توضع المادة في بوتقة تسخين لتبخير المادة. توضع مادة ملائمة سائدة للغشاء الميخر في مكان ملائم حيث تصبح مطلية بطبقة من المادة المبخرة. يعتمد سمك هذه الطبقة على معدل التبخير والمسافة بينها وبين المصدر والزمن الذي يستمر فيه التبخير. يقطع الغشاء الى قطع صغيرة ملائمة ثم تحرر من المادة الساندة اما بتعويمها بالماء او بإذابة المادة الساندة بمذيب ملائم (كما في حالة كون المادة الساندة ملح الطعام (rock salt) فيذاب في الماء على سبيل المثال). تلتقط هذه القطع فيما بعد من سطح السائل باستخدام المشبك الساند (support grid) الخاص ومن ثم يثبت على حامل النموذج ليوضع في المجهر ويكون جاهز للفحص . تعطي بعض المواد مثل الكربون أغشية لابلورية اما القسم الاخر من المواد فتعطي أغشية بلورية.

ب- طبعة السطح (surface replica) : يمكن دراسة تضاريس سطح النموذج وبقدرة تمييز عالية بعمل طبعة سطحية تكون خفيفة ومن ثم ملائمة للمجهر، يتم عمل الطبعة بعمليات تتضمن مرحلة او مرحلتين.

تطلى طبقة رقيقة من مادة ما، في طريقة المرحلة الواحدة، على سطح العينة كما مبين في (i) و (ii) من الشكل (7-34) (a). فعلى سبيل المثال يمكن نشر قطره او قطرتين من محلول مادة لدائنية مثل الفورمفر (formvar) على السطح وتركها لتجف. أما إذا أريد قدرة تمييز عالية للعمل يمكن تبخير الكربون لتكوين غشاء كربوني على السطح وهو ما يستخدم غالباً. يمكن ان ينتزع هذا الغشاء الذي يمثل طبقة السطح، من سطح النموذج كما في الشكل (iii) ومن ثم يتم تقطيعه الى قطع ملائمة للفحص بالمجهر.



الشكل (7-34) (a) عملية تكوين الطبعة بمرحلة واحدة. سطح النموذج في (i) مُهيئ للعملية (ii) مطلي بمادة الطبعة (iii) الغشاء مخلوع من السطح ليعطي الطبعة، (iv) التظليل، أي أن معدناً عالي العدد الذري قد بُخِرَ على السطح وبزاوية قليلة ليؤدي إلى تظليل التضاريس السطحية ومن ثم رؤيتها بوضوح.

(b) عملية ذات مرحلتين فالطبعة الأولى في (iii) أكثر سمكاً من سابقتها ومن ثم فهي أقوى من طريقة المرحلة الواحدة يتم عمل طبعة رقيقة للطبعة الأولى ملائمة للفحص بالمجهر النفاذ كما في (v) ويتم تضليلها حسب الحاجة.

(c) تحتاج طبعة الاستخلاص إلى سطح محضر بحيث تكون دقائق الطور الثاني ناتئة منه كما في (i) يتم طلاء مادة الطبعة على هذا السطح ثم يذاب الجسم (النموذج) الصلب ليترك بعض الدقائق مطمورة في الطبعة كما في (ii).

أما إذا لم يمكن إزالة الطبعة من السطح من دون تضررها فعندئذ يمكن عمل المرحلتين. فيطلى السطح بغشاء سميك من اللدائن (plastic) حيث ترتسم طبعة السطح عليه والذي يمكن إزالته من السطح بالسحب بسبب قوته، بواسطة شريط لاصق أو بتعويمه في الماء. يتم طلاء طبعة السطح هذه بطبعة أخرى من الكربون كما مبين في (iv) من الشكل (34-7) (b) ثم تذاب المادة اللدائنية فيما بعد لتترك طبعة الكربون حرة كما في (v) .

ان التباين المتولد من هذه الطبعة غير جيد ، لكنه يمكن زيادته بطلاء كامل الطبعة او سطح النموذج قبل أخذ الطبعة بطبقة رقيقة من معدن ثقيل والذي يمتص بدوره الالكترونات اكثر مما تمتصه مادة الطبعة. فييخر المعدن على سطح النموذج وبزاوية مائلة كما مبين في الشكل (34-7). فيعمل ترسب المعدن الثقيل ظلالةً لمعالم (تضاريس) السطح مما يزيد من التباين بصوره واضحة من جهة ويعزز تجسيم الصورة من جهة اخرى.

يمكن أيضاً دراسة توزيع وحجم وشكل الجسيمات المترسبة في المادة المدروسة بهذه الطريقة وتسمى عندئذ طبعة الاستخلاص السطحية (extraction surface replica) وفيها يحضر السطح مسبقاً (على سبيل المثال يتم اظهاره بمحلول اظهار مناسب) بحيث ان جزء من الترسبات يكون فوق مستوى السطح قليلاً. الشكل (34-7) (c) . تُطلى مادة الطبعة على السطح فيما بعد ثم تذاب المادة الأساس للنموذج لتترك الترسبات وقد انغrust (علقت) في غشاء الطبعة. يتم تقطيع الغشاء ، كما سبق ، الى قطع تتلائم والفحص المجهرى.

هناك تقنيات اخرى لتحضير اغشية رقيقة ملائمة للفحص المجهرى الالكتروني تتضمن: الترسيب الكهروكيميائى على سطح مادة سائدة حيث يمكن اذابة المادة السائدة وتحرير الغشاء المراد فحصه ، على سبيل المثال حديد على نحاس. او تكوين

طبقة اوكسيد رقيقة تذاب بعدها المادة الصلبة التحتيه (تستخدم هذه التقنية بصوره خاصه مع الالمنيوم وسبائكه)؛ او تفاعل خليط من الغازات الملائمة لتكوين نواتج على هيئة بلورات صغيرة، يمكن التقاط بعضها على شبكة حاملة لها وفحصها بالمجهر.

٢- التحضير من جرم النماذج نفسها: Preparation from bulk samples

يجب ان تقي النماذج المحضرة للفحص بالمجهر النافذ بمتطلبين اساسيين:

أ- ان تكون خفيفة بصورة كافية بحيث تسمح للإلكترونات بالنفوذ من دون فقدان كبير في طاقتها.

ب- يجب ان تمثل المادة الاساس في البنيه والتكوين الكيماوي اي يجب تجنب اي تلويث او نواتج تفاعل اخرى او تشويه ثانوي او تعريض للحرارة اثناء عملية التحضير.

تتضمن عملية التحضير هذه مرحلتين:

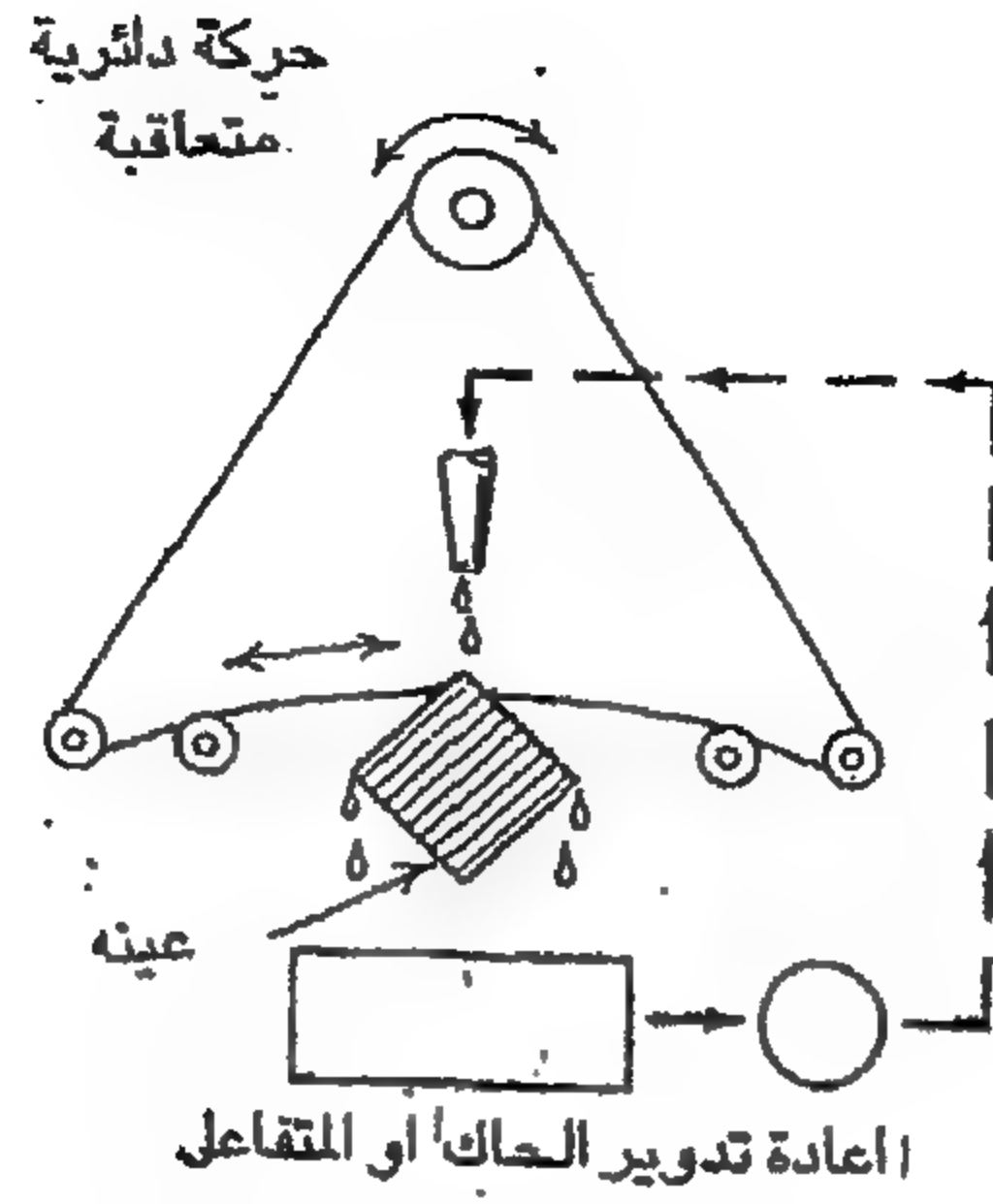
١- المرحلة الأولى : وهي الحصول على شرائح اولية خفيفة بحدود (0.5mm) او أقل من ذلك من المادة المراد دراستها.

تتم هذه المرحلة باحدى الوسائل التالية:

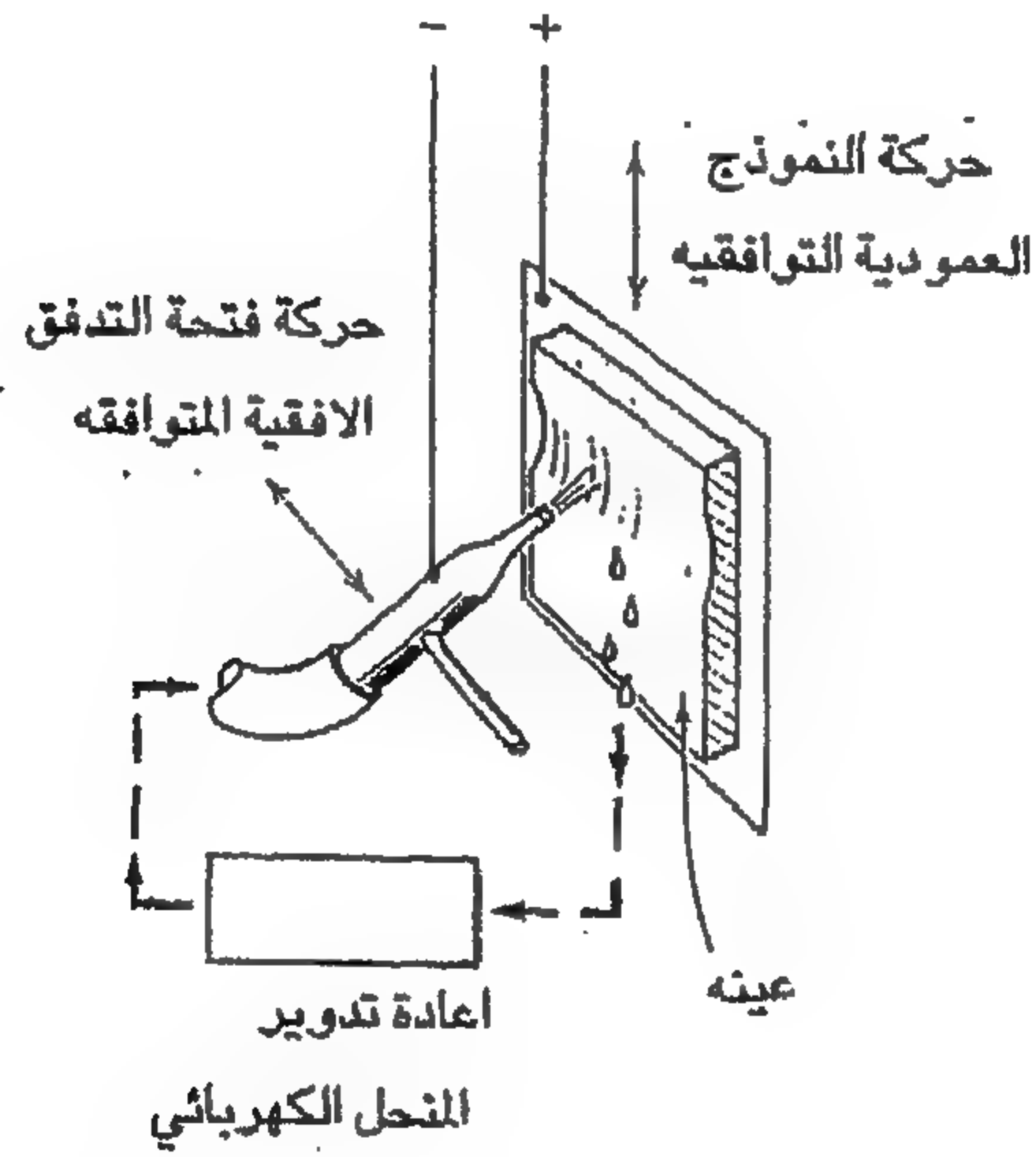
أ- القطع بالمنشار الميكانيكي الرقيق والناعم وباستخدام سائل للتبريد للحفاظ على بنية النموذج من التغيير.

ب- القطع بالخيطة كيماوياً كما موضح في الشكل (7-35) وتستغرق هذه الطريقة وقتاً طويلاً نسبياً.

ج- تخفيف المقاطع السميكة بتدفق السائل كهروكيميائياً الشكل (7-36) .



الشكل (35-7) طريقة الحصول على الرقائق (slices) من جرم النموذج بواسطة منشار الخيط الكيماوي.



الشكل (36-7) طريقه ترقيق (تخفيف) الشرائح السميكة المقطع وتحويلها الى شرائح رقيقة بجهاز تدفق المنحل الكهربائي ومن جهة واحدة في كل مرة.

د- القطع بجهاز القطع بالشرر الكهربائي (spark erosion cutter) والذي ينتج تجارياً لهذا الغرض. وفيه يتم غمر النموذج المراد قطعه في ماء مقطر او نطف ابيض (Kerosen) ويربط الى احد الاقطاب وهو الارضي (earth) ويقرب منه سلك متحرك يلتف باستمرار على بكره وبينهما (السلك والنموذج) فولتية عالية مناسبة فيحدث تفريغ بينهما . ونتيجة لذلك تنصهر مناطق موضعية من النموذج ثم يبتعد السلك قليلاً ويعاود الاقتراب ثانية وهكذا حتى يتم الحصول على شريحة خفيفة نسبياً من النموذج.

٢- المرحلة الثانية: وهي مرحلة التخفيف النهائي اي الحصول على مناطق رقيقة يمكن فحصها وأخذ صوره لها بالمجهر الالكتروني النافذ. ويمكن استخدام واحده من التقنيات التالية وحسب طبيعة وشكل النموذج.

أ- التخفيف الكيماوي:

هناك العديد من المواد يمكن اذابتها في المحاليل الملائمة وبسرعة نسبياً، فتوضع الشريحة المراد تخفيفها (ترقيقها) ولفترة معينة حتى يتم تخفيفها وتكون ملائمة للفحص. إلا أنه من النادر الحصول على نماذج صقيله السطح ورقيقة بحيث تلائم الفحص المجهرى. وتتوفر في بعض المصادر جداول بالمحاليل الملائمة للمواد المراد فحصها على سبيل المثال L.E.Murr* .

ب- الأنشطار Cleaving :

تكون بنية بعض المواد البلورية على هيئة طبقات كالميك (Mica) فيمكن فلقها (شطرها) والحصول على طبقات ذات سمك قد يبلغ 20nm في الظروف الملائمة. وذلك بلصق شريط لاصق على كل من وجهي البلوره الرقيقه وسحبه فتتشطر البلوره الى طبقات أرق. وهكذا حتى يتم الحصول على طبقة رقيقة ملائمة للفحص.

* L.E.Murr, "Electron optical Application in Materials Science" 1970 .

ج- السحق (السحن) crushing :

لا يمكن شطر المواد الهشة كالزجاج والصخور وسواها إلا أنه يمكن سحقها لتتحول الى دقائق ناعمة. فيمكن ان يكون قسم منها (الصفائحية او القشرية الشكل) رقيقة الى حد أنها ملائمة للفحص بالمجهر الالكتروني النافذ.

د- تقنية الصقل الكهربائي Electropolishing Techigue :

ويمكن ان تقسم الى ثلاث تقنيات رئيسية هي :

١- طريقة الفتحة (الشباك) window Technigue وتسمى ايضاً طريقة خلية المنحل الكهربائي (electrolytic cell method) .

٢- طريقة القطب المدبب (pointed - electrode method) وتدعى ايضاً بطريقة بولمان (Bollmann) .

٣- طريقة التدفق (Jet method) .

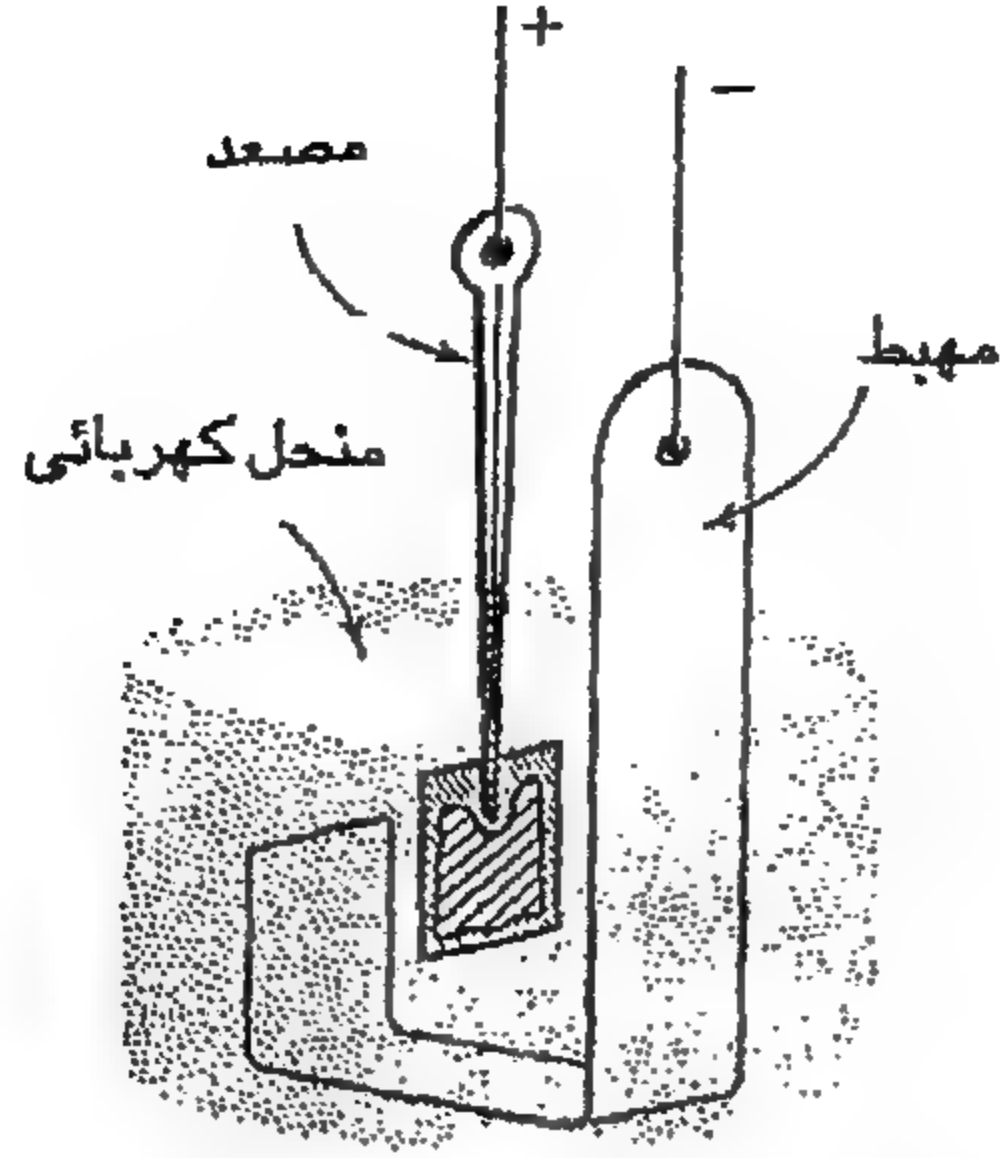
وطرائق الصقل الكهربائي هذه ملائمة لتحضير عينات من المواد الموصلة كالمعادن والسبائك ولذلك تعتبر من أهم التقنيات في فحص البنية الدقيقة (micro-structure) للمعادن والسبائك.

١- طريقة الشباك: وفي هذه الطريقة يتم صبغ حافات النموذج الذي هو على شكل صفيحة رقيقة نسبياً بصبغ او صمغ او شمع الك (Lacquer)، على سبيل المثال، بحيث لايتفاعل مع المنحل الكهربائي (electrolytic solution) ومن ثم يحمي الحافات من التفاعل مع المنحل. يعلق النموذج الذي يمثل المصعد (anode) في وسط وعاء صغير سعته حوالي 200ml يحتوي على المنحل بحيث ينغمر النموذج كلياً في المنحل. يكون المهبط (cathode) من نفس مادة النموذج او من فولاذ مقاوم للصدأ وبهيئة شريط عل شكل حرف U او اسطوانة تحيط بالمصعد (النموذج) شكل

(7-37) . تسلط فولتية معينة (وحسب مساحة النموذج و تركيز ودرجة حرارة المنحل الكهربائي) بحيث يمر تيار مناسب في المحلول (حوالي 80mA). تظهر بعد برهة من بدء مرور التيار ثقب في شبك الرقاقة . وعند الاستمرار في عملية الصقل الكهربائي تكبر الثقوب شيئاً فشيئاً وتقترب من بعضها وعندئذ ستحتوي الشريحة (الشباك) على مقاطع رقيقة اي شفاقة للإلكترونات عند الحافات، كما في الشكل (7-38) . يكون مقدار التيار والفولتية التي تعطي احسن ظروف صقل، عند منطقة ثبوت التيار (Plateau) في منحنى الفولتية / تيار المرسوم لتلك المنظومة ، الشكل (7-39) .

٢- طريقة القطب المدبب: يوضح الشكل (7-40) هذه التقنية. يكون المصعد فيها هو حامل النموذج والمهبط عباره عن قطبين مدبيين من الفولاذ المقاوم للصدأ. يكون قياس النموذج على وجه التقريب 1x2 cm ويعلق في المصعد بين القطبين المدبيين (المهبط) بحيث تكون المسافة بينهما من كل جهة حوالي 0.5 mm . وبالقرب من مركز النموذج. يظهر ثقب بعد فترة وجيزة من الصقل، يحرك بعدها النموذج بحيث يكون القطبان بين الثقب والحافة الاقرب للنموذج وعندها يتم سحبهما الى مسافة ابعد عن سطح النموذج (حوالي 1 الى 2mm) . تستمر بعدها عملية الصقل الكهربائي عند نفس مقدار التيار الذي استخدم اولاً حتى تحدث فجوة (فتحة) في الحافة كما هو مبين في الشكل (7-38) اعلاه. يمكن ايقاف العملية قبل ان تتكون فتحة في الحافة حيث يكون ذلك مفضلاً في بعض التطبيقات. يتم قطع القطعتين الموجودتين على جانبي الفتحة حيث تكون جاهزة للفحص بعد الغسل والتجفيف طبعاً.

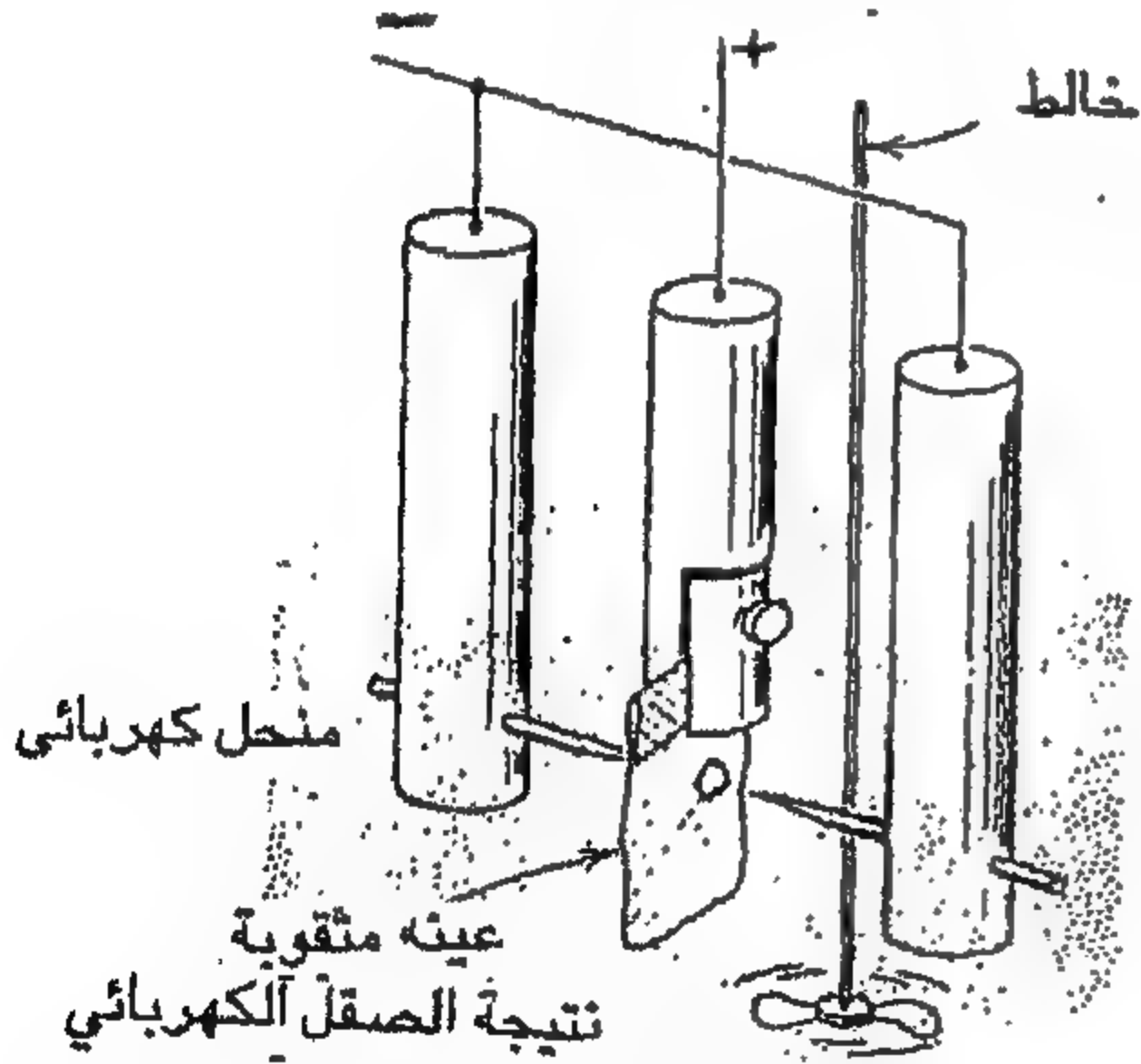
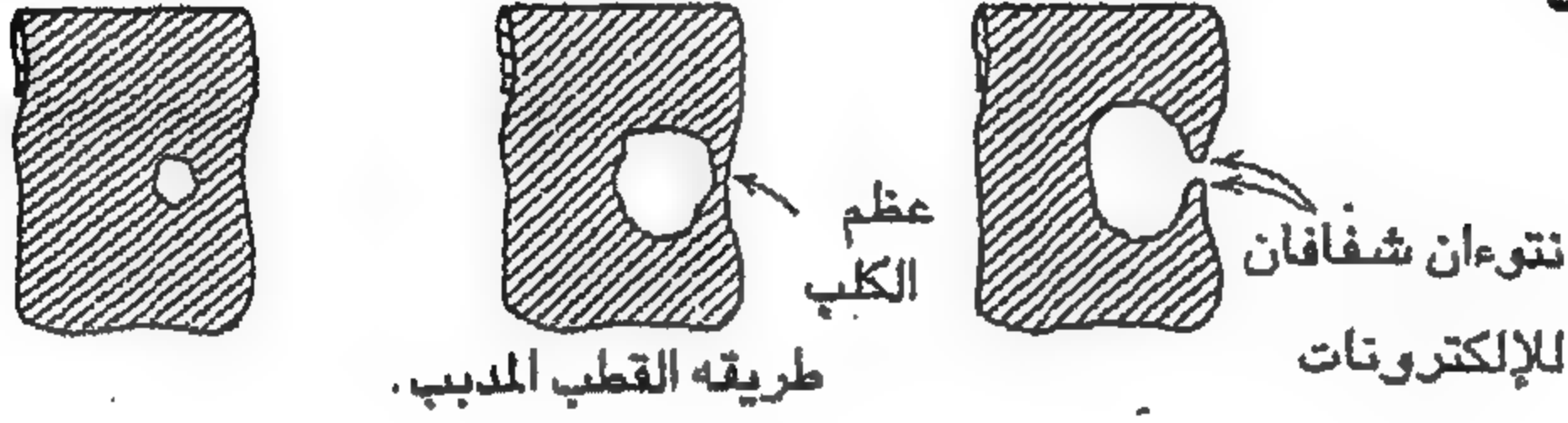
وفي كلتا الطريقتين آنفتي الذكر يعتمد النجاح في الحصول على اجزاء رقيقة صالحة للفحص المجهرى على تركيز المحلول ونوعه ودرجة الحرارة وتحريك المحلول والتيار والفولتية اضافة الى النظافة والتأني في العمل لأن الاستعجال يؤدي الى بعثرة الجهود ومن ثم الى نتائج غير مرضية.



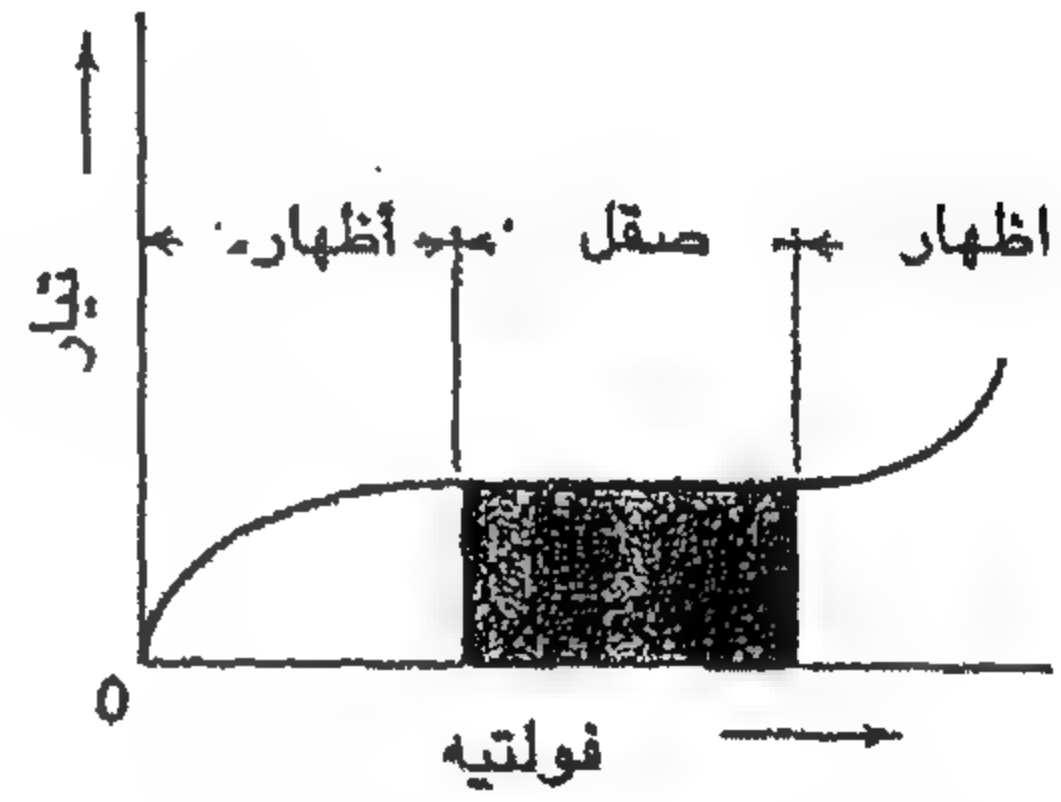
الشكل (7-37) طريقة الشبك
وهي احدى طرق الترقيق
بالصقل الكهربائي.



الشكل (7-38) نشوء المناطق
الرقيقة والشفافة للإلكترونات
اثناء عملية الصقل الكهربائي.

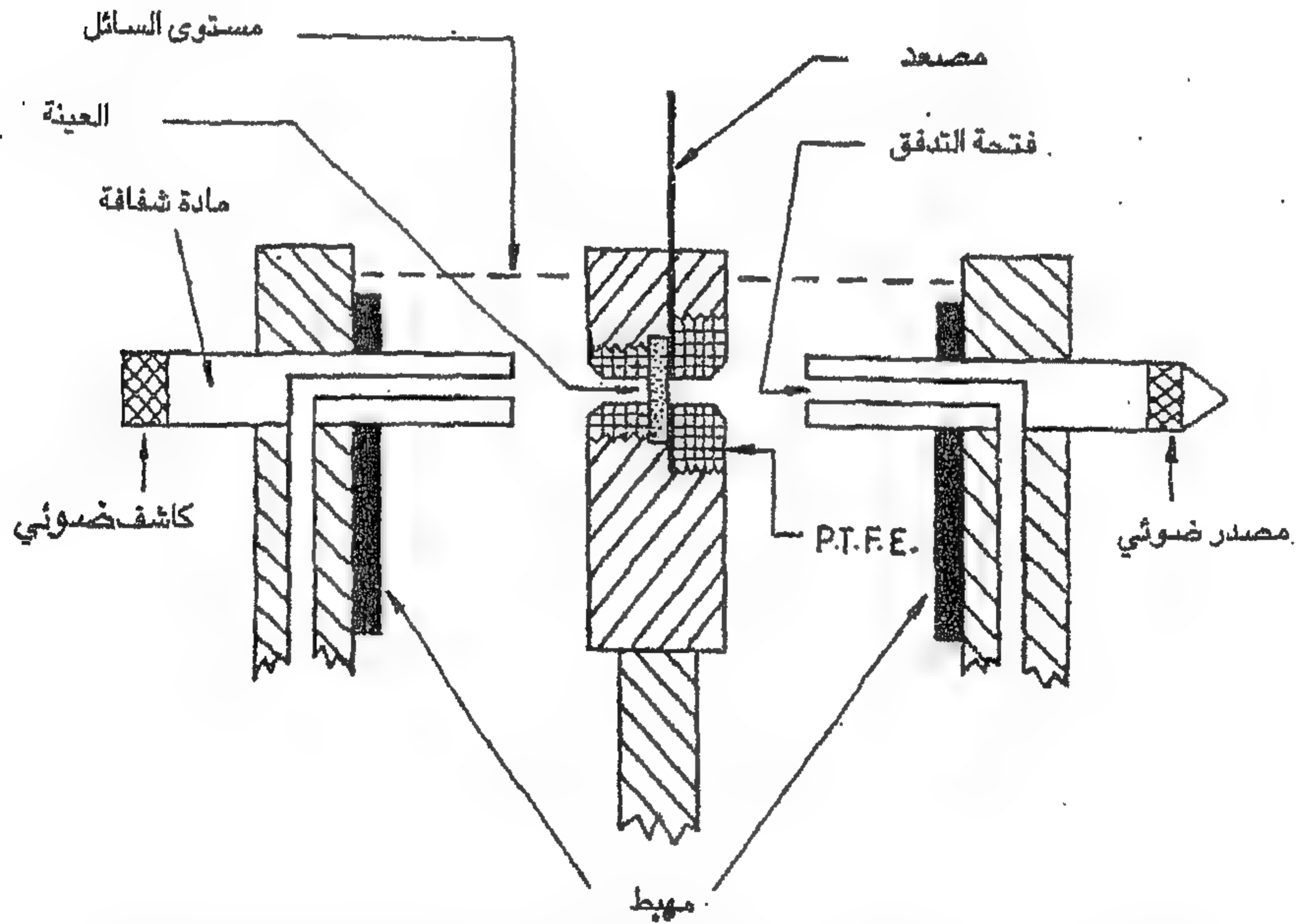


الشكل (7-40) الصقل
الكهربائي بطريقة الاقطاب
المدببة (طريقة بولمان).



الشكل (7-39) منحنى اختيار
الفولتية المناسبة للصقل
الكهربائي.

٣- طريقة التدفق Jet method : يجب ان يكون النموذج في هذه التقنية على شكل قرص قطره 3mm (وهو نفس قطر حامل العينه في المجهر الالكتروني النافذ). يوضع هذا القرص الذي سمكه حوالي 0.4mm في المركز بين فتحتي انبوبيين قطر كل منهما 1mm . يتدفق المنحل الكهربائي الملائم منهما على مركزي سطحي القرص . تستخدم فولتيه وتيار ودرجة حرارة ملائمة . على سبيل المثال ، في حالة الالمنيوم يستخدم 20V ، و 80mA مع محلول متكون من 20% حامض البيركلوريك "Perchloric acid" مضافاً اليه 80% كحول ايثيلي نقي وعند درجة الصفر المئوي). تستمر العملية حتى حدوث ثقب في النموذج وعند هذه اللحظة تقطع خليه ضوئية الدائرة الكهربائية آلياً ، يمثل الشكل (7-41) مخططاً لهذا الجهاز . يتم غسل القرص حال حدوث الثقب بالكحول ثم يجفف ويكون جاهزاً للفحص . يكون ربط النموذج الى القطب الموجب ويمثل المصعد ويستخدم قطب آخر من الفولاذ المقاوم للصدأ كقطب سالب (المهبط) ويكون الاخير مغموراً في المنحل باستمرار.



الشكل (7-41) الصقل بالمنحل الكهربائي بتقنية التدفق على جهتي العينه.

هـ- التخفيف بالقذف الأيوني Ion beam Thinning

وتتضمن هذه الطريقة قذف ذرات سطح النموذج بأيونات عالية الطاقة (غالباً ما تكون أيونات الأركون وذات طاقة بين 5 إلى 10keV) وفي جو مفرغ وتعرف هذه الطريقة بتقنية الرش (sputtering technique). يتم تركيز حزمة الأيونات لتهاجم مساحة محدودة من العينة. ويختلف معدل الإزالة من مادة إلى أخرى وحسب خواص مادة العينة، تستخدم هذه التقنية بشكل عام في المواد المتكونة من طورين أو أكثر. وذلك لأنه عندما يزال الطور الأسهل تصبح مناطقته منخفضة عن بقية مناطق سطح العينة، بالنسبة لمستوي حزمة الأيونات، ولذا تبقى محمية حتى تتم تعرية وإزالة الأجزاء الأصل (الاطوار الأخرى). وهكذا تتم إزالة طبقات متعاقبة بالتساوي من سطح النموذج إلى أن يتم الحصول على سمك ملائم للفحص المجهرى. إن العيب الأساس في هذه الطريقة هو كلفة الأجهزة العالية واللازمة لهذه العملية إضافة إلى طول المدة المستغرقة (حوالي 24 ساعة) لكل عينة.

١٢-٥-٧ بعض تطبيقات المجهر الإلكتروني النافذ:

“Some Applications of TEM”

لقد تمت الإشارة هنا وهناك إلى قسم قليل من التطبيقات إلا أنه من المفيد ذكرها بتفصيل أكثر.

يمكن استخدام المجهر الإلكتروني النافذ لدراسة الكثير من الماهيات كالبنى المجهرية للمواد البلورية وغير البلورية والترسبات من حيث أشكالها وتوزيعها وطبيعتها وكذلك الحدود البلورية وأهدابها وأشباه البلورات والتوأمة (twinning) وخلل النسق (stacking fault) إضافة إلى الانخلاعات (dislocations) والخلايا الانخلاعية (dislocation cells) وعند مختلف الظروف، هذا بالنسبة لتقنية المجال

المضيء (bright field image) . أما عند استخدام تقنية المجال المظلم (dark field image) فيمكن الحصول على معلوماتٍ مكملّة لمعلومات المجال المضيء حيث يمكن دراسة المناطق أو الترسبات الحادثة للإلكترونات حيث تظهر مضيئة في ارضية معتمّة. في حين يمكن بتقنية حيود الالكترونات دراسة الاطوار الموجودة في النموذج حتى ولو كانت صغيرة سواء في ذلك الترسبات أو نواتج التآكل والتأكسد. وكذلك التمييز بين المواد البلورية وغير البلورية وحتى التمييز بين المواد المتعددة البلورات واحادية البلوره. كما يمكن بتقنية الحيود التنبؤ بوجود التوجه التفضيلي (Preferred orientation) في المعادن وخصوصاً بعد اجراء عمليات التشويه اللدن (Plastic deformation). علماً بأن تقنية حيود الالكترونات تعطي معلومات أكثر وأدق مما هو عليه في حالة حيود الاشعة السينية. وقد لاتصلح الاشعة السينية لدراسة حيود بعض المواد (كما مرّ ذكره) وذلك لكبر طولها الموجي النسبي وعدم امكانية تحقيق قانون براك، حيث ان الطول الموجي للإلكترونات اقصر بكثير من طول موجة الاشعة السينية المستخدمة في الحيود.

اما على المستوى الكمي فيمكن قياس الحجم الحبيبي اذا كان صغيراً جداً (حيث لا يلائم المجهر الضوئي لذلك) أو حجم أشباه الحبيبات (subgrains) أو حجم الخلايا الانخلاعية أو قياس كثافة الانخلاعات وعند مختلف مستويات الانزلاق . وكذلك قياس سمك الرقيقة المعدنية (تحت الفحص). اضافة الى قياس طاقة خلل النسق (Stacking fault energy) وقياس ثابت الخلية (Lattice constant) سواء للمواد احادية البلوره او متعددة البلورات وبدقة عالية. ومن الجدير بالذكر أنه يلزم تبريد العينه، باستخدام تقنية الاصبع البارد (Cold finger) . لأن الحرارة المتولدة من جرّاء سقوط الحزمة الالكترونية على العينه تغيّر بعض معالم البنية الدقيقة لها،

فعلى سبيل المثال، تتغير كثافة الانخلاعات وأشكالها وأسلوب تجمعها وربما تتغير الخلايا الانخلاعية وحتى أشباه الحبيبات ، في بعض الحالات ، أيضاً بسبب الحرارة المتولدة من الحزمة الالكترونية الساقطة.

ومن الممكن أيضاً قياس المسافة بين المستويات البلورية وبصوره مباشرة تقريباً وذلك عندما يكون النموذج رقيقاً جداً والجهاز ذو قدره تمييز عالية جداً وعند السماح للحزمة الالكترونية النافذة مع واحدة او اثنتين من الحزم المحادة بالدخول الى الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية (objective aperture) ونتيجة لتداخل هذه الحزم تظهر اهداباً لها علاقة مباشرة مع المستويات البلورية للعينة.

تمارين الفصل السابع - القسم الأول-

- ١- استخراج الطول الموجي للإلكترونات عند استخدام فولتية تعجيل قدرها 1MV . ملاحظة، استخدام العلاقة الخاصة المعتمدة على النظرية النسبية مرة ثم العلاقة المشتقة بطريقة الميكانيك التقليدي مرة أخرى . علق على النتيجة.
- ٢- ماهي النسبة بين حدي التمييز للمجهر الإلكتروني عند 100kV فولتية تعجيل وذلك للذي للمجهر الضوئي عند استخدام الضوء الأصفر (5000Å)، إذا فرض أن بقية الظروف متساوية. ماذا تستنتج من ذلك.
- ٣- اذكر نواتج التفاعل بين الحزمة الإلكترونية الساقطة والجسم الصلب مع رسم تخطيطي يوضح ذلك.
- ٤- ماهي أهم عيوب العدسات المغناطيسية مع ذكر كيفية التقليل من أثرها.
- ٥- اشرح طرائق توليد الإلكترونات مع الرسم التوضيحي كلما لزم ذلك.
- ٦- عدد أهم أنواع الصور التي يمكن أخذها بالمجهر النافذ مع ذكر كيفية تحقيقها وما هي الفائدة منها.
- ٧- أ- ماذا يعني نمط الحيود الإلكتروني لمادة ما.
ب- ماهو الفرق بين صورتين المجال المضيء والمظلم.
- ٨- أ- وضعت بلورتان منفردتان رقيقتان من الذهب "Au" والبلاديوم (Pd) على بعضهما بحيث تكون مستوياتهما البلورية متوازية، ثم فحصت بالمجهر الإلكتروني النافذ (TEM) . كانت المسافة بين أهداف موارده الخاصة بالمستويات (022) هي 0.52mm . ماهي قوة تكبير الجهاز.

ب- تراكب غشاءان متماثلان من الذهب بزاوية ، وعند نفس تكبير الفرع (أ). وقد وجد ان المسافة البينية للأهداب في نمط مواره غير المتوازي، للمستويات (022) هي 0.25mm. ماهي الزاوية بين مجموعتي هذه المستويات. علماً بأن للذهب والبلاديوم بنية (fcc) وأن ثابت البلوره للذهب $a_{Au}=4.08 \text{ Å}$ وللبلاديوم $a_{Pd}=3.92 \text{ Å}$.

٩- اذا سئلت ان تقيس كثافة الانخلاعات (dislocation density) على سبيل المثال، في قطعة من الالمنيوم 1x1x5 cm باستخدام المجهر الإلكتروني النافذ. فاشرح باختصار أفضل طريقة لتحضير نموذج صالح للفحص المجهرى ويمثل المادة الأساس.

١٠- يمثل الرسم أدناه نمط حيود الالكترونات لعنصر النيكل (fcc) متعدد البلورات، ثابت الشبكة $a_{Ni}=3.524 \text{ Å}$ احسب ثابت الكاميرا (λL) بالوحدات (mm.Å) بواسطة رسم المنحني.

١١- أ- عرّف عمق المجال وعمق التبئير.

ب- احسب عمق التبئير لمجهر الكتروني يعمل عند قوة تكبير مقدارها 20000 ضعف، اذا كان عمق المجال فيه (300 nm).

١٢- أ- اذكر أنواع التباين الصوري في المجهر الإلكتروني النافذ.

ب- ارسم مخططاً توضيحياً للمجهر الإلكتروني النافذ.

١٣- احسب قطر الفتحة الضوية للعدسة الشيئية (بالميكرومتر) في المجهر الإلكتروني النافذ لقطع الحزمة الإلكترونية المحادة الثانية من النحاس ($a=3.615\text{\AA}$) اذا علمت ان الفولتية المستخدمة كانت 200kV وأن البعد البؤري للعدسة الشيئية (2mm).

١٤- اذكر كيف تتم رؤية مايلي، تحت المجهر الإلكتروني النافذ:

أ- الانخلاعات ب- خلل النسق ج- الترسيبات

د- التوأمة (twinning) هـ- الحدود البلورية و- أشباه البلورات (subgrains).

٧-٦ المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) Scanning Electron Microscope

٧-٦-١ المقدمة:

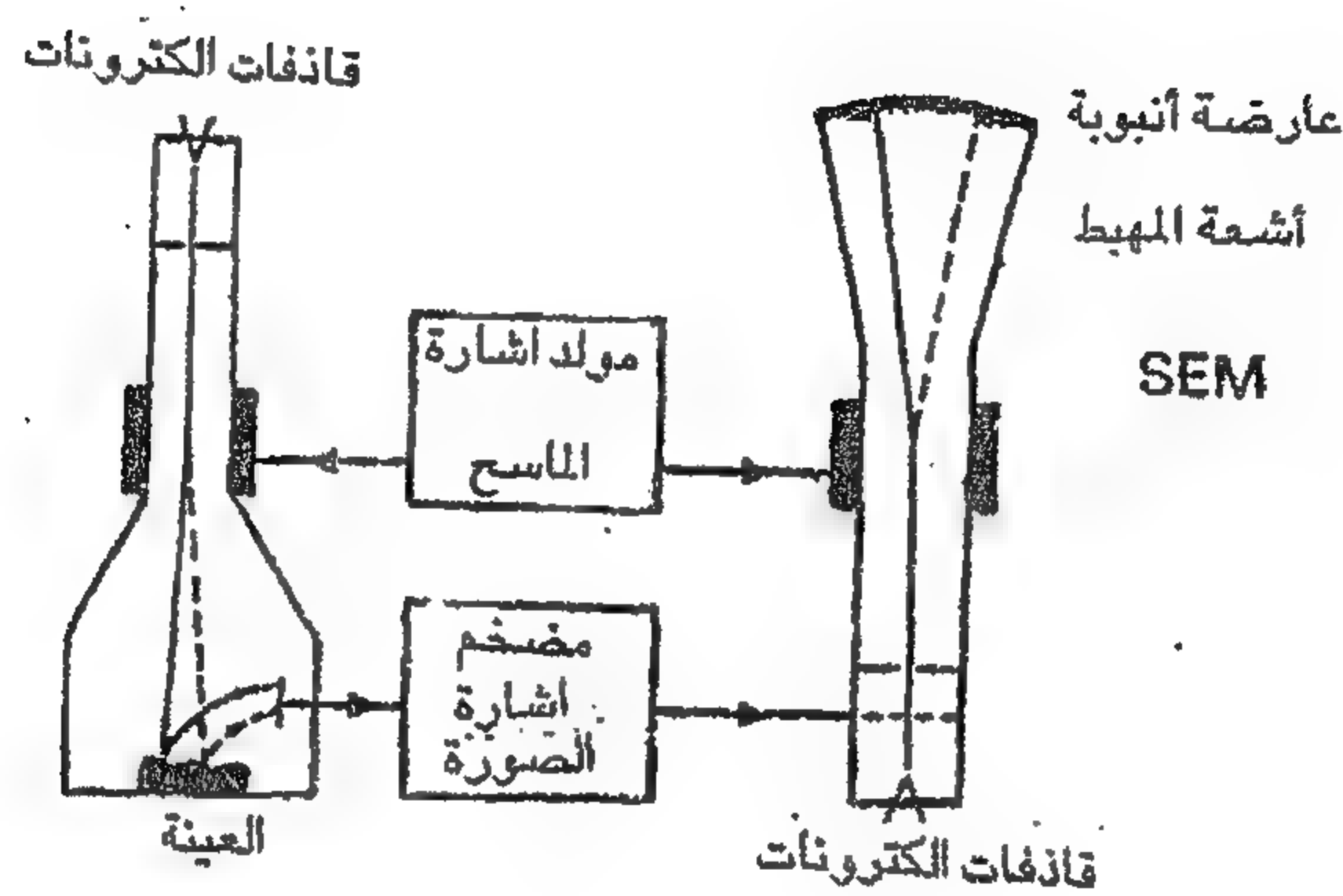
صمم المجهر الإلكتروني الماسح أساساً لدراسة سطوح الاجسام الصلبة عند قدرات تكبير عالية. فيمكن من هذه الناحية مقارنته بالمجهر الضوئي العاكس (reflected back microscope). وبسبب استخدام الحزمة الإلكترونية يمكن الحصول على معلومات كثيرة جداً حول اتجاه البلورة والتكوين الكيماوي والبنية المغناطيسية او الجهد الكهربائي (electrical potential) في النموذج.

٧-٦-٢ أساس عمل المجهر الماسح:

تتكون الصورة في المجهر الماسح بألية مختلفة تماماً عن تلك التي في المجهر الضوئي او حتى في المجهر الإلكتروني النافذ (TEM). حيث يتم بناء الصورة نقطة فنقطة بصورة مشابهة لتكوّن الصورة على شاشة التلفاز، فلا تستخدم عدسة شبيئية اذن. يتم تبئير حزمة الكترونية رفيعة عالية الطاقة بهيئة نقطة قطرها اقل من (5nm) على النموذج. يؤدي هذا الى انبعاث الكترونات ثانوية ذات مدى واسع من الطاقة من تلك النقطة من السطح. يتم جمع وتكبير الالكترونات المنبعثة لتعطي اشارة كهربائية (electrical signal) تستخدم هذه الإشارة لتغيير شدة الحزمة الإلكترونية في عارضة انبوبة أشعة المهبط (cathod ray tube) فتتكون نقطة واحدة من الصورة على عارضة انبوبة أشعة المهبط. ولأجل بناء كامل الصورة يتم مسح مساحة معينه من سطح النموذج من قبل الحزمة الإلكترونية في المجهر (يدعى نمط خطوط المسح بالراسم) وفي نفس الوقت يتم مسح عارضة انبوبة أشعة المهبط (CRT) من قبل حزماتها الإلكترونية بنمط مسح يتشابه هندسياً مع نمط المسح الأول. فالصورة المتكونة على عارضة انبوبة أشعة المهبط هي في الواقع خارطة لشدة الالكترونات المنبعثة من سطح النموذج.

يمثل الشكل (7-42) أساس عمل المجهر الإلكتروني الماسح.

يمكن تغيير التكبير في المجهر الماسح من 20 الى 800 000 ضعف. أما حد التمييز له فهو حوالي 2.5 nm مقارنة بحوالي 300 nm للمجهر الضوئي .



الشكل (7-42) نظام ماسح الحزمة الإلكترونية المستخدمة

في المجهر الإلكتروني الماسح ، بشكل تخطيطي.

٧-٦-٣ تصميم وبناء المجهر الإلكتروني الماسح:

يتضمن المجهر الأجزاء الأساسية التالية مع عملها بصورة مقتضبه :

١- القاذف الإلكتروني: لتوليد حزمة ضيقة من الإلكترونات والتي يتم تعجيلها خلال فرق جهد عالي يصل الي 50kV .

٢- اثنين او ثلاثة عدسات لتبئير الحزمة الإلكترونية الى ادق ما يمكن.

- ٣- نظام لحرف الحزمة الالكترونية على النموذج بموجب نمط خطوط المسح .
- ٤- مرحلة النموذج والتي تسمح للنموذج بالحركة الدائرية والمائلة وغيرها.
- ٥- جهاز لجمع وتكبير الالكترونات المنبعثة من النموذج والمنعكسة عنه.
- ٦- انبوية أشعة المهبط أو أية وسيلة أخرى لعرض الصورة.
- ٧- دوائر الكترونية لتوليد أو السيطرة على مولد الماسح وتكبير الإشارة والقاذف الالكتروني والفولتية المعجلة وتيار العدسات وغيرها.
- ٨- نظام تفريغ ذات سعة عالية، لتفريغ عمود المجهر وحجرة النماذج. يبين الشكل (7-43) رسم تخطيطي للمجهر الماسح موضحاً الاجزاء الرئيسية فيه.

الشكل (7-43) رسم تخطيطي للمجهر الالكتروني الماسح. أما التفاصيل
كعدد العدسات وغيرها فتختلف من مجهر الى آخر وحسب الشركة المصنعة.

ومن الجدير بالذكر ان العدسات الكهرومغناطيسية المكثفة والقاذف الالكتروني المستخدمة في المجهر الالكتروني الماسح مشابهة من حيث الاساس عما هو عليه في المجهر الالكتروني النافذ.

وسيتم التطرق الى بعض الاجزاء او المراحل غير المتشابهة مع ما هو موجود في المجهر النافذ (TEM) .

أ- مرحلة النموذج specimen stage :

يلزم ان تكون مرحلة النموذج مستقرة ميكانيكياً وتقبل اكبر ما يمكن من النماذج. ويمكن فيها تحريك النموذج بالاتجاهات الثلاثة المتعامدة اضافة الى دوران النموذج وامالته لان ذلك يؤثر في تباين الصورة. كما قد يتم تزويد مرحلة النموذج بتسهيلات تسخين او تبريد للنموذج او حتى اجراء بعض الفحوصات الميكانيكية او التآكل داخل حجرة النموذج في المجهر.

ب- جامع الالكترونات Electron collector

ويتألف من شبكة في المقدمة والتي يمكن ان تحيز بفرق جهد مقداره $\pm 250V$ نسبة الى النموذج (الموصول بالأرضي) . يقع الانبعاث الالكتروني من النموذج ضمن منطقتين اساسيتين ، فالالكترونات عالية الطاقة والكترونات (ثانوية) منخفضة الطاقة. يمكن اذن استخدام فرق جهد الانحياز على الشبكة اما لسحب اكثر ما يمكن من الالكترونات الثانوية الى الجامع (في حالة جهد الانحياز الموجب) او ارجاعها منعكسة الى الخلف (في حالة جهد الانحياز السالب) بحيث يسمح للإلكترونات ذات الطاقة العالية فقط لتشارك في تكوين الصورة . تمر الالكترونات المنتقاة خلال الشبكة وتدخل الى قفص جامع الالكترونات حيث تنجذب بقوة نحو العداد الومضي بجهد مقداره حوالي $+12kV$. يتم ارسال الضوء الومضي الى المضاعف الفوتوني (photomultiplier) حيث يتم تضخيمه واستخدامه في تغيير شدة الحزمة

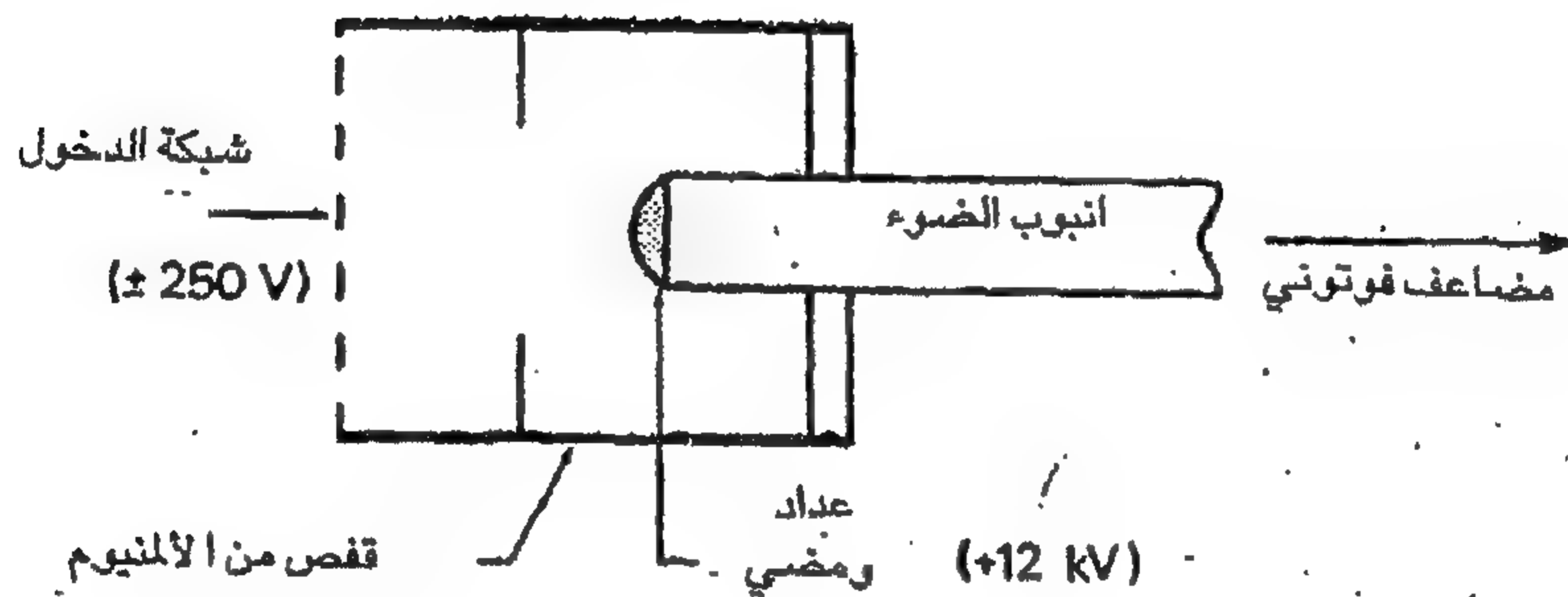
الالكترونية في انبوبة عرض اشعة المهبط. يبين الشكل (7-44) رسم تخطيطي لجامع الالكترونات.

٤-٦-٧ آليات تباين الصورة:

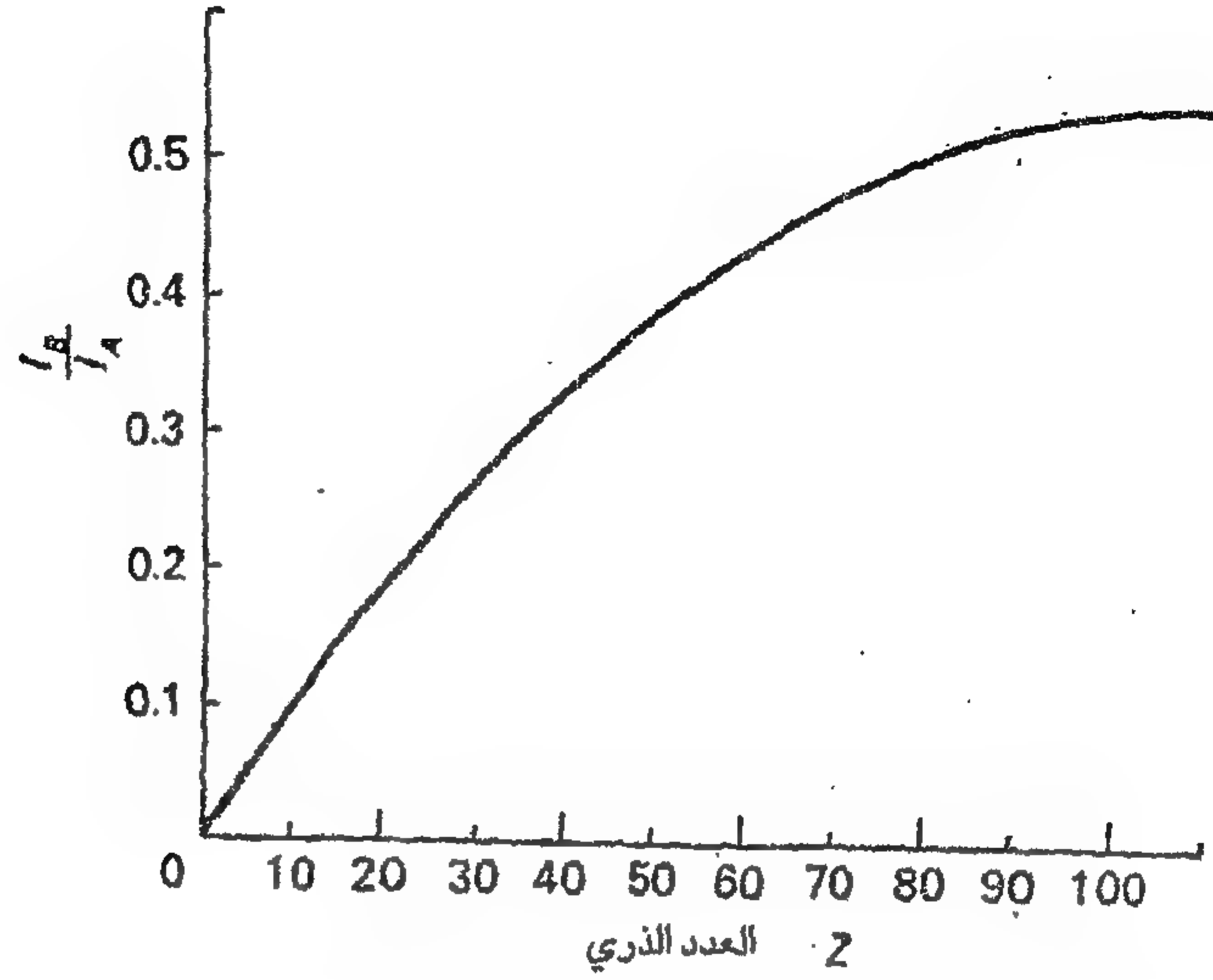
يحدث التباين الصوري في المجهر الالكتروني الماسح نتيجة للتفاعل بين الحزمة الالكترونية والنموذج. أما انواع الآليات فهي:

أ- انبعاث الالكترونات:

تعتمد الالكترونات المجمعة والى مدى معين على العدد الذري (Z) لذلك فمن المتوقع وجود تباين العدد الذري.



الشكل (7-44) رسم تخطيطي لجامع الالكترونات. تبقى الشبكة عند فولتية بحدود $+250 \text{ V}$ لجذب الالكترونات الثانوية وعند -250 V لابعادها. اما الجهد العالي $+12 \text{ kV}$ على العداد المتألق (scintillator) فهو لضمان ان كل الالكترونات التي في القفص سيتم جذبها الى العداد المتألق حيث تصطدم به وبطاقة كافية.



الشكل (45-7) نسبة الاستطارة الخلفية الى الامتصاص مع العدد الذري.

فإذا كانت المساحة تحت الفحص مكوّنه من عناصر مختلفة العدد الذري فمن المتوقع ان تصبح درجة الامتصاص اقل عند زيادة الكثافة (زيادة العدد الذري). وكنتيجه لذلك سيزداد عدد الالكترونات المنعكسة (المستطارة رجوعاً) بزيادة العدد الذري كما في الشكل (45-7) حيث تمثل I_B شدة الالكترونات المنعكسة (المستطارة الى الخلف) و I_A الجزء الممتص من الحزمة الالكترونية في النموذج.

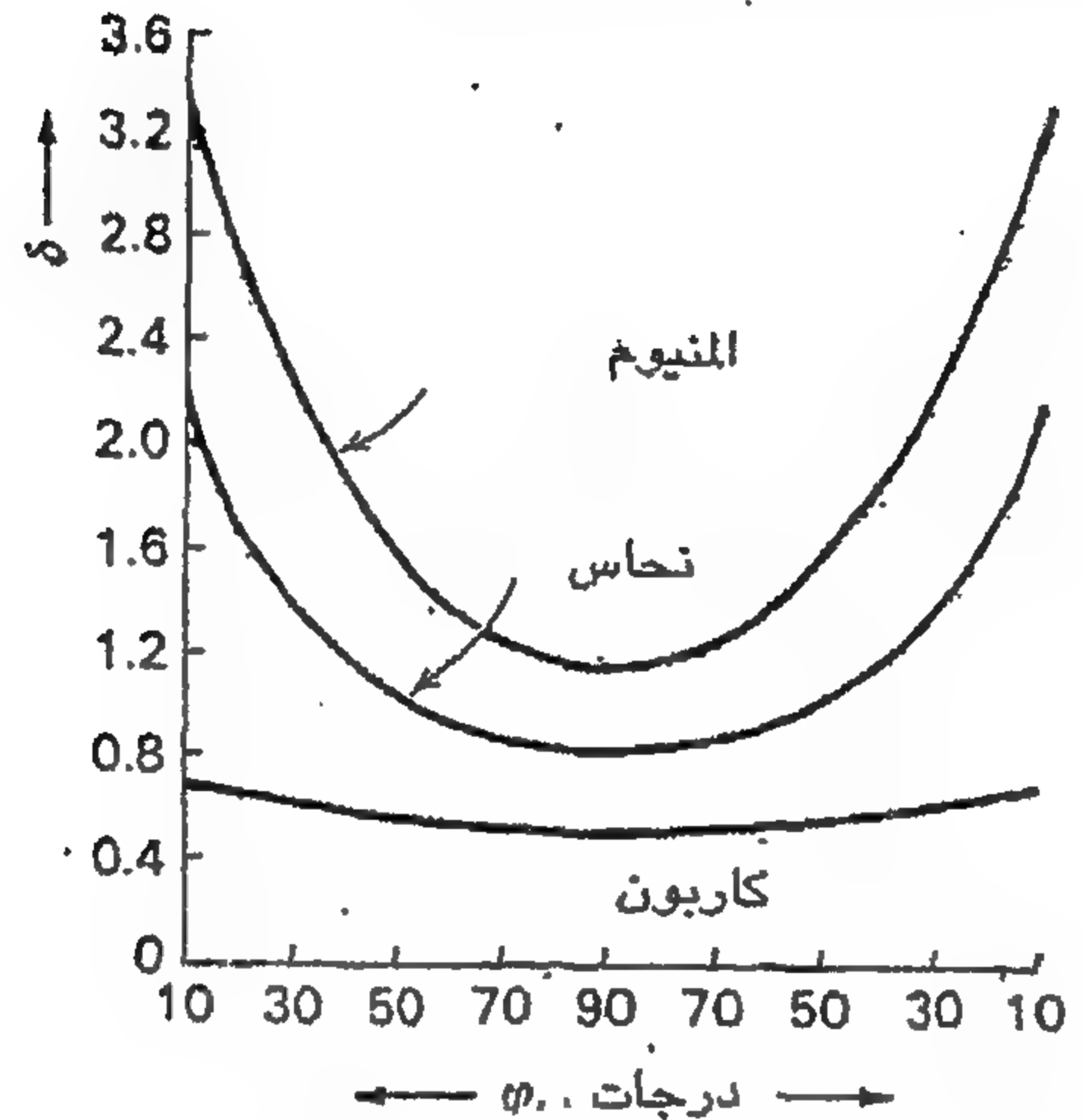
أما انبعاث الالكترونات الثانوية فيعتمد على عدة عوامل:

- ١- الفولتية المعجلة للإلكترونات الساقطة.
- ٢- بنية السطح وخاصة الزاوية التي تصنعها الالكترونات الساقطة مع اي منطقة من مناطق السطح كما موضح في الشكلين (46-7) و (47-7) .

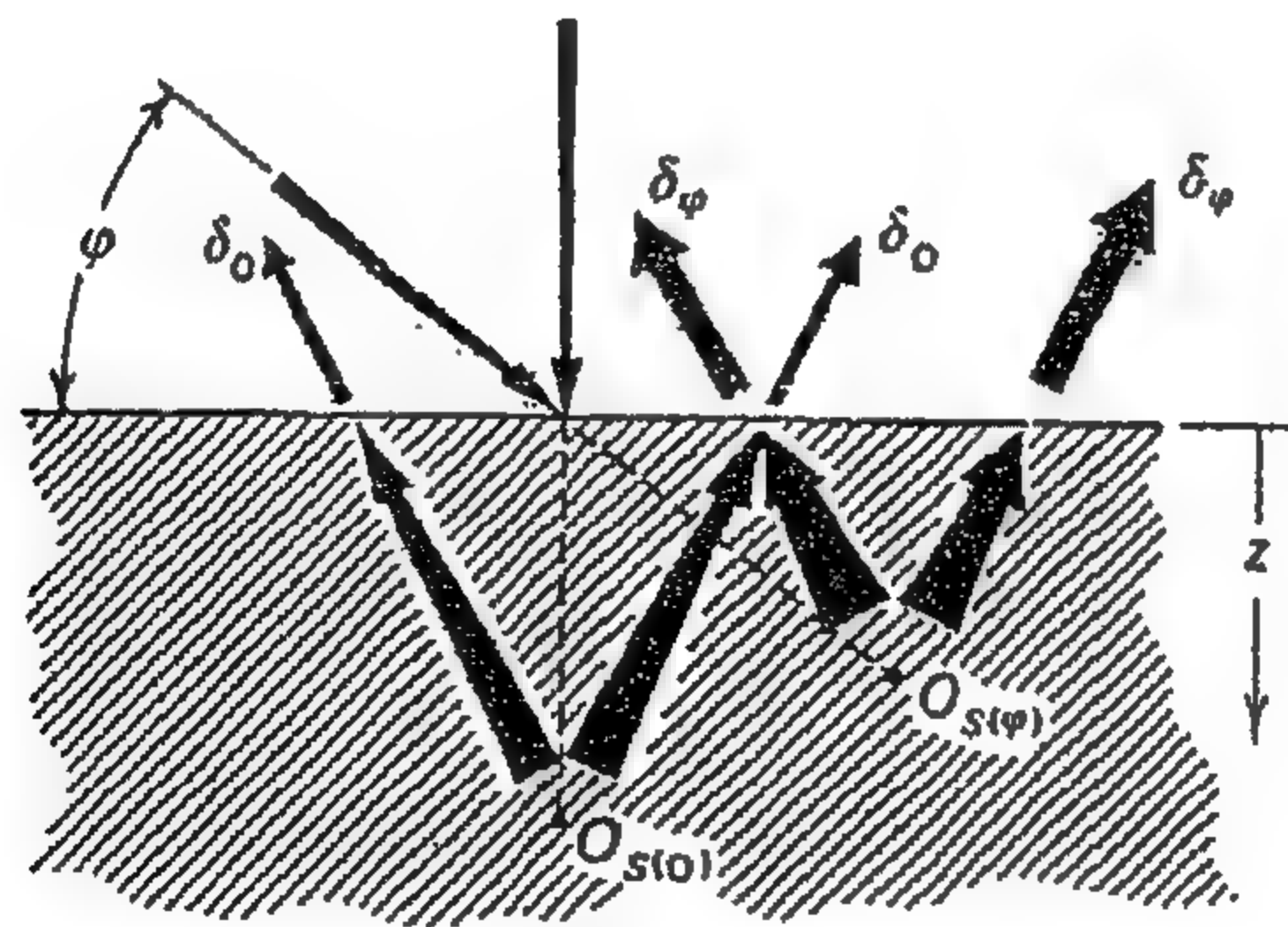
٣- الكثافة الموضعية لأي منطقة على السطح والتي تؤثر على قدرة اختراق الإلكترونات الساقطة وامتصاص الإلكترونات الثانوية.

٤- التكوين الكيماوي والبنية البلورية للسطح حيث يؤثر ذلك على حاجز الجهد (دالة الشغل) للإلكترونات الثانوية.

٥- التجمع الموضعي للشحنة الكهربائية على السطح.



الشكل (7-46) ناتج انبعاث الإلكترونات الثانوية كدالة للحزمة الإلكترونية الأولية الساقطة.

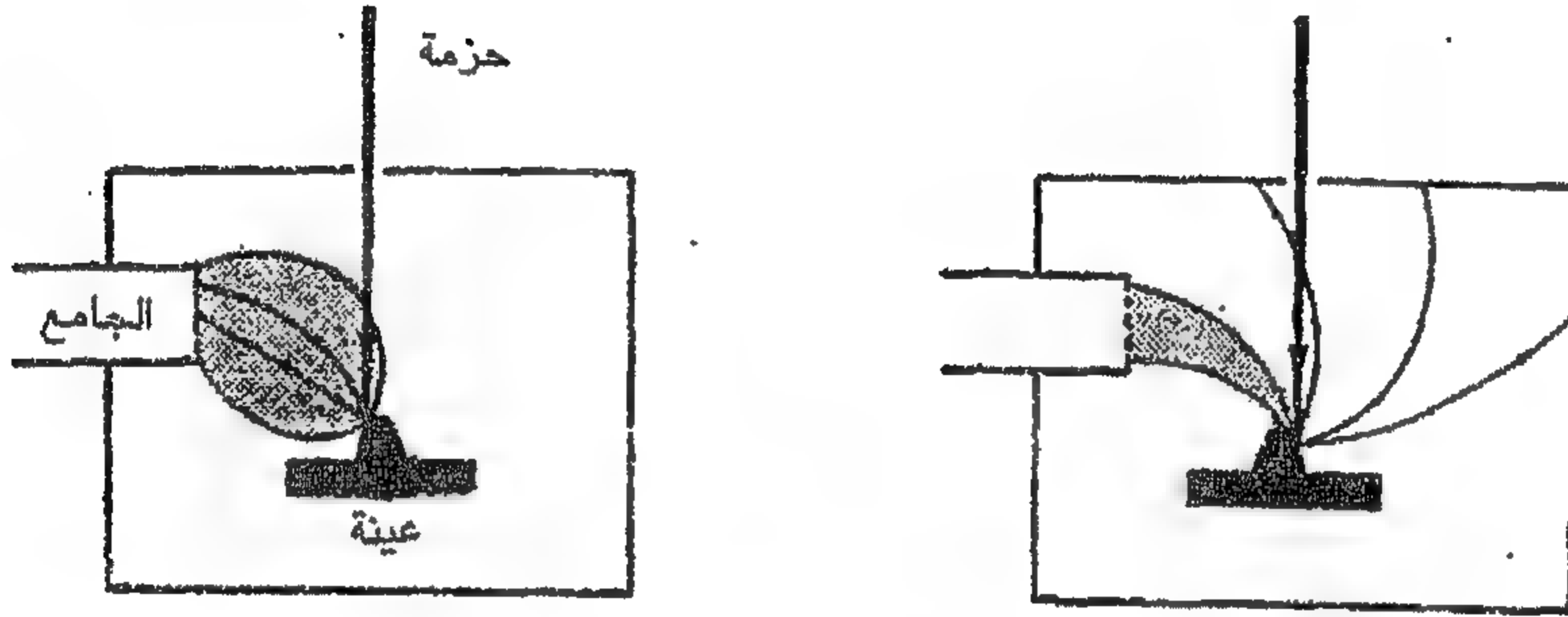


الشكل (7-47) ناتج انبعاث الإلكترونات الثانوية من الحزمة الأولية الساقطة.

٦- التضاريس السطحية حيث يعطي تغيير زاوية انبعاث الالكترونات نوع من التباين ايضاً ، الشكلان (48-7) و (49-7) .

ب- الانبعاث الفوتوني :

١- الضوء المرئي، يتم جمع الفوتونات المنبعثة وتحويلها الى اشارة كهربائية مضخمة ومن ثم استخدامها في تغيير شدة الحزمة الالكترونية المكونة للصورة في عارضة انبوبة أشعة المهبط مثلاً.



الشكل (48-7) تعزيز تباين التضاريس في المجهر الالكتروني الماسح من خلال الفرق في كفاءة جمع الالكترونات الثانوية، اعتماداً على مساراتها الاولى والتضاريس الموضعية فالسطوح المواجهة لجامع الالكترونات تظهر أكثر اضاءة من تلك التي تكون سطوحها غير متوافقة مع اتجاه جامع الالكترونات.

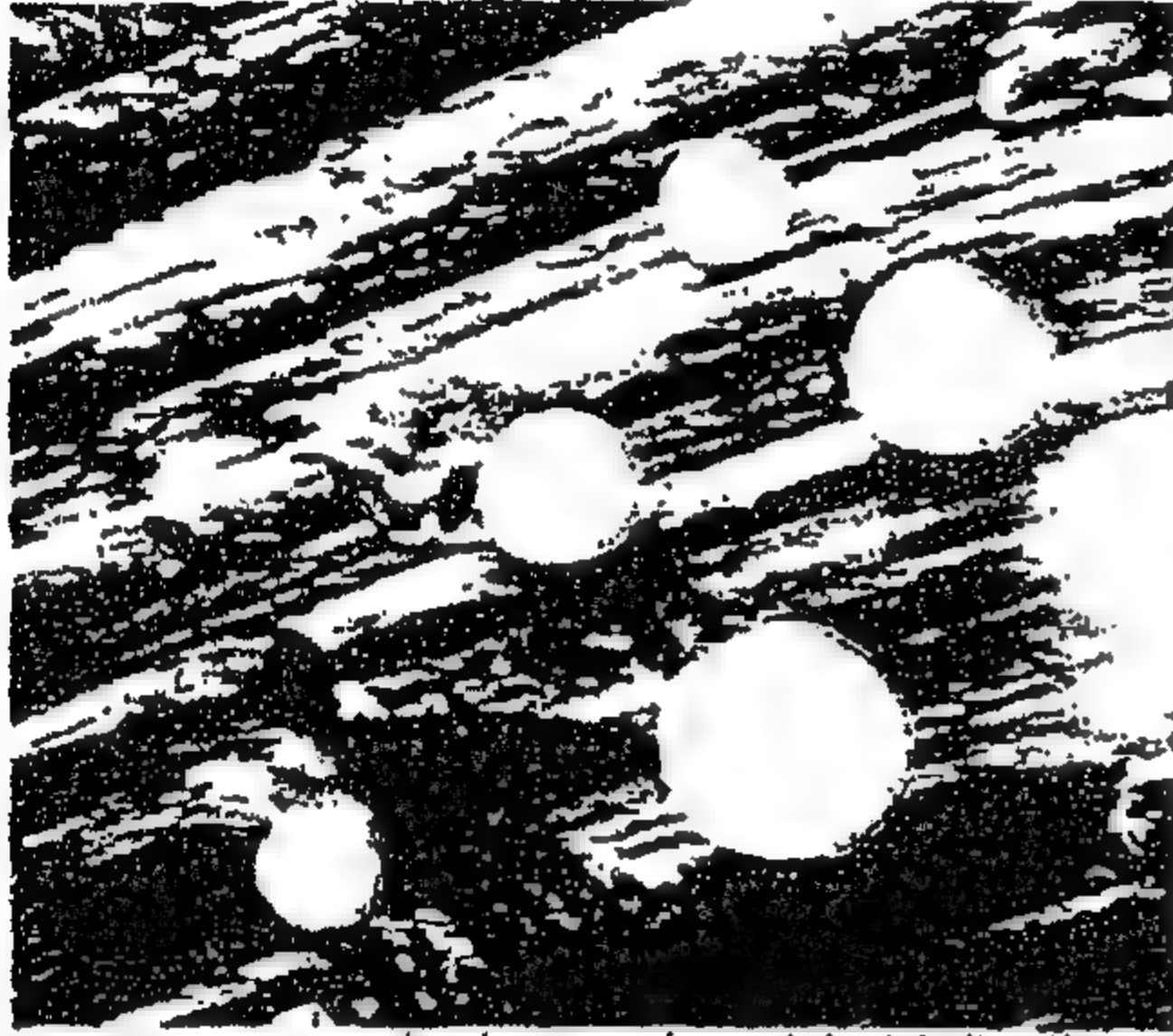
٢- انبعاث الاشعة السينية ، بما أن تردد (ν) الفوتونات المنبعثة هو صفة مميزة للعنصر المراد دراسته كما عبر عنه قانون موزلي (Moseley's law) .

$$\nu = A (Z-C)^2 \quad \text{..... (30-7)}$$

يمثل Z العدد الذري لعنصر النموذج و C و A ثابتان لكل نوع من الخطوط

المميزة ($K\alpha$ أو $L\alpha$ الى آخره). لذلك تعطي قياسات الطول الموجي و شدة الاشعة السينية المنبعثة فكرة عن التحليل الكيماوي للعناصر الموجودة في النموذج.

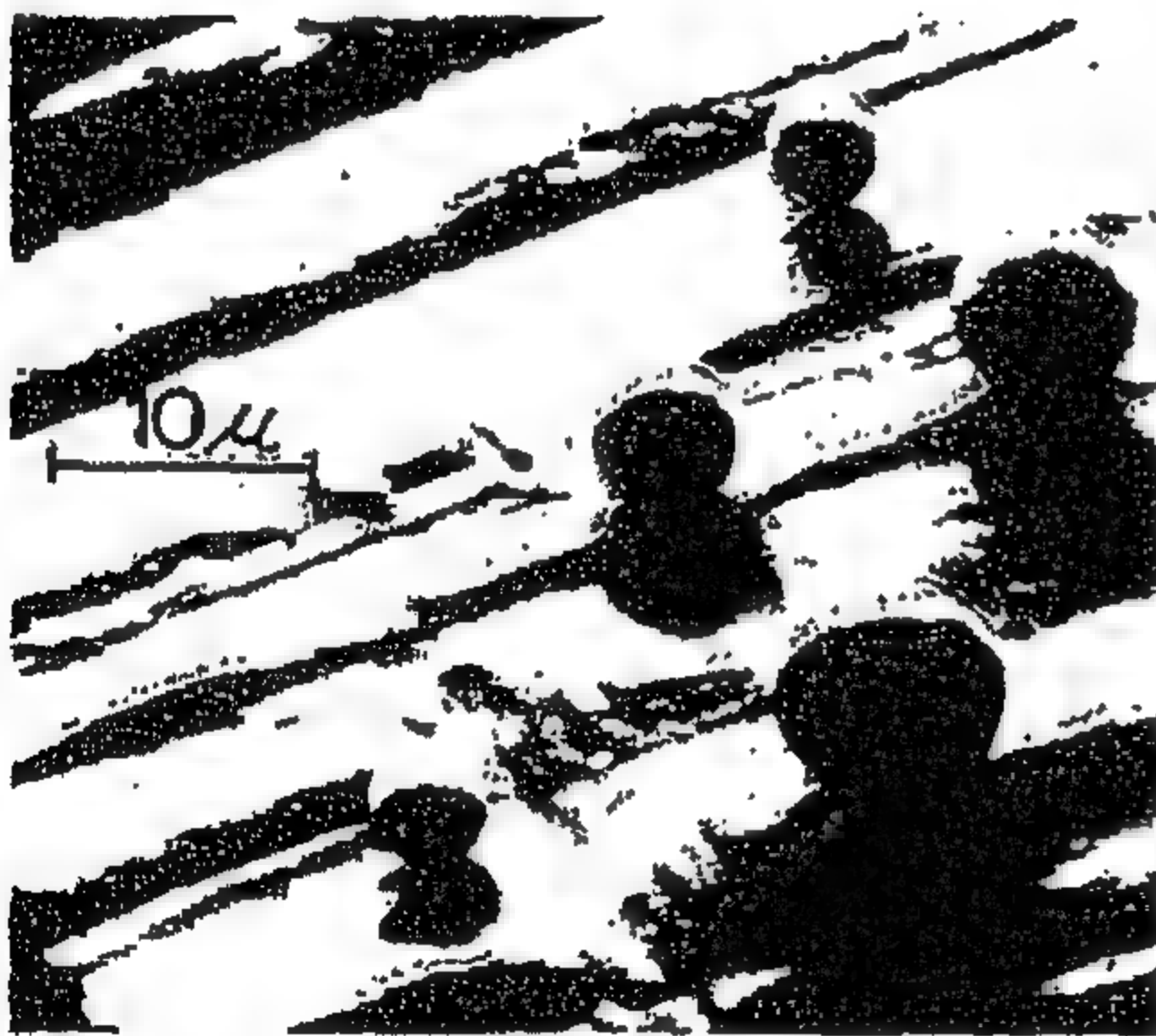
وعند استخدام شدة الاشعة السينية المميزة المنبعثة من عنصر معين في تغيير شدة الحزمة الالكترونية في عارضة انبوبة اشعة المهبط (راسم الصورة) فينتج عن ذلك صورة تمثل توزيع ذلك العنصر في النموذج المفحوص.



(a)

الشكل (7-49) صورتان
بالمجهر الالكتروني الماسح
لدقائق من النحاس على اساس
من الالمنيوم. الصورتان
مأخوذتان بجهاز المجهر
الالكتروني الماسح الجسم.

(a) صورة بالالكترونات
الثانوية.



(b)

(b) صورة بالالكترونات
المستطارة الى
الخلف (الراجعة).

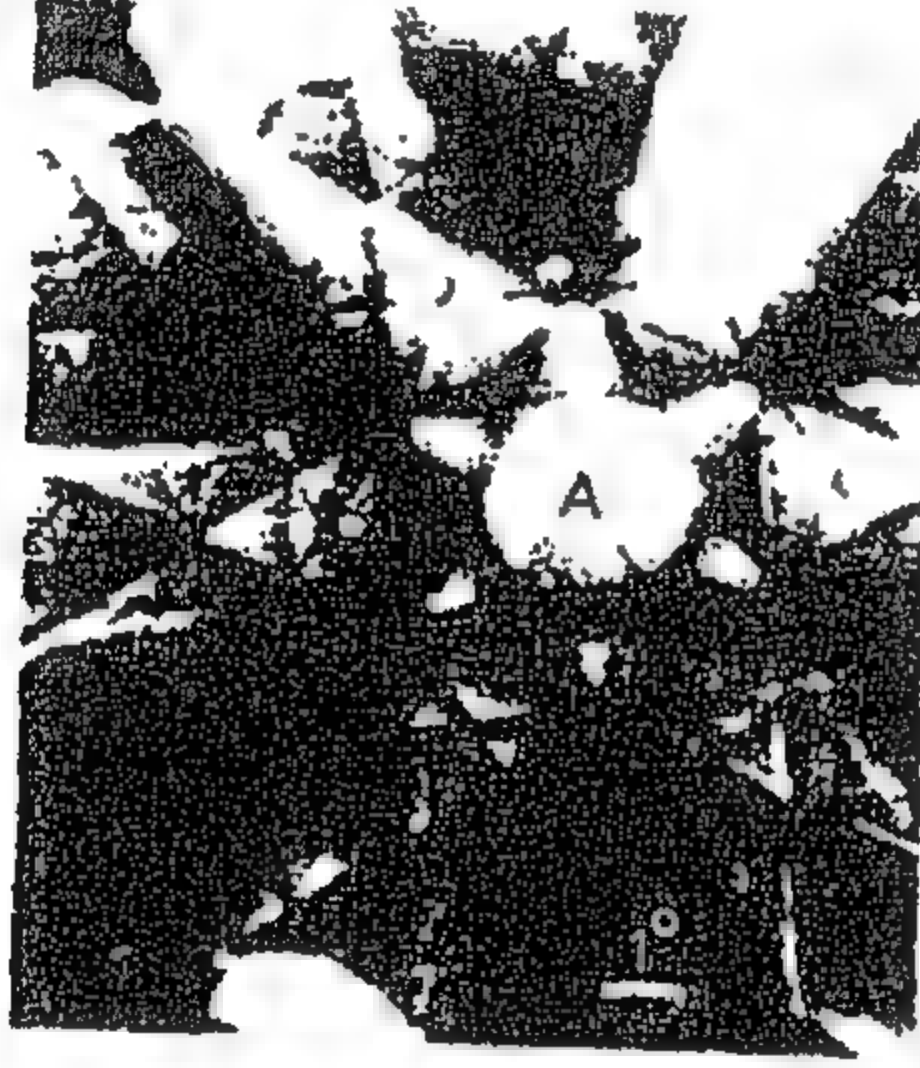
ج- تباين المجال المغناطيسي:

إذا كان المجال المغناطيسي خارج النموذج قوي بصورة كافية (في بعض المواد) بحيث يؤثر على مسارات الالكترونات الثانوية فإن التغيير في كفاءة جمع الالكترونات الناتجة عن ذلك تعطي هذا النوع من التباين.

د- تباين اقنية الالكترونات والتباين البلوري :

يحدث هذا النوع من التباين في النماذج البلورية فقط، والذي يعطي معلومات حول التناظر البلوري وحجم الخلية الأساسية والاتجاه البلوري.

وينشأ هذا التباين لان حزمة الالكترونات الساقطة تعاني من ظاهرة الحيود عندما تدخل الى البلورة والتي تُعرف بأقنية الالكترونات ، يعتمد مقدار الاقنية في المستوى الذري الواحد على مقدار تراص ذراته والمسافة الفاصلة بين نفس المستويات. يؤدي هذا الى تغيير في انبعاث الالكترونات الثانوية عند تغيير زاوية سقوط الحزمة الإلكترونية الأساسية. يبين الشكل (7-50) نمط الاقنية الحاصل من بلورة السليكون الاحادية.



الشكل (7-50) نمط الاقنية الخاص ببلورة احادية من السليكون.

٧-٦-٥ تحضير العينات Specimen preparation :

يتم تحضير العينات للمجهر الإلكتروني الماسح بسهولة خصوصاً بالنسبة للمواد جيدة التوصيل للكهرباء. وتتضمن العملية تنظيف النموذج ولصقه بصمغ موصل للكهرباء على قرص صغير من الألمنيوم فيه مسمار لتثبيته على قاعدة حامل العينات في المجهر ، الشكل (7-51) .



الشكل (7-51) نماذج المجهر الإلكتروني الماسح مثبتة على حاملات النماذج الخاصة.

يمكن استخدام نماذج أبعادها بحدود عدة مليمترات لكل بعد اما النماذج الكبيرة فيمكن استخدامها إلا أن ذلك يكون على حساب الحرية في حركة النموذج في واحد أو أكثر من الاتجاهات الثلاثة. وقد صُنعت الآن مجاهر لها حجرة نماذج كبيرة جداً قد تبلغ أبعادها 30x30x10 cm وذلك لفحص النماذج (الاجزاء) الكبيرة لاتلافياً (اي من دون الحاجة الى قطع النموذج). كما يمكن أيضاً استخدام تقنية الطبعة السطحية اللدائنية (plastic surface replica) لدراسة سطوح الاجسام الكبيرة ايضاً ويجب بالطبع ان تعامل هذه الطبعة معاملة النماذج العازلة. والأشكال الوارد في حالة المواد العازلة هي أنها تجمع الشحنة الكهربائية الواردة من الحزمة الإلكترونية الأساسية . تحيد هذه الشحنة مسار كل من الحزمة الإلكترونية الأساسية والإلكترونات المجمعة ولذا تنتج صورة مشوهة بدرجة كبيرة. لذلك يمكن طلاء النماذج العازلة بطبقة رقيقة من مادة موصلة وتكفي لذلك طبقة سمكها حوالي 20nm من الكربون او الفضة او الذهب او اية مادة موصلة مشابهة. تتم عملية الطلاء داخل جهاز التبخير المفرغ.

٦-٦-٧ تطبيقات المجهر الإلكتروني الماسح:

يمكن استخدام المجهر الماسح لدراسة العديد من الخواص والصفات الخاصة بالنموذج فعلى سبيل المثال يمكن :

١- دراسة تضاريس السطح؛ وهي من أهم الوظائف الأساسية للمجهر الماسح وذلك بفضل ما يتمتع به من عمق مجال عال يجعله مؤهلاً لفحص التضاريس. حيث يمكننا من الحصول على صورة بثلاثة أبعاد (مجسمة) بسرعة وبدقة عاليتين إلى جانب قدرته العالية للتمييز والتكبير. فعلى سبيل المثال يمكن دراسة مكسر النماذج و السطوح المعرضة للتآكل والأكسدة والبلى بمختلف أنواعه إضافة إلى دراسة حجم وتوزيع الدقائق الصغيرة والأكاسيد والحجم الحبيبي وغيرها.

٢- التكوين الكيماوي:

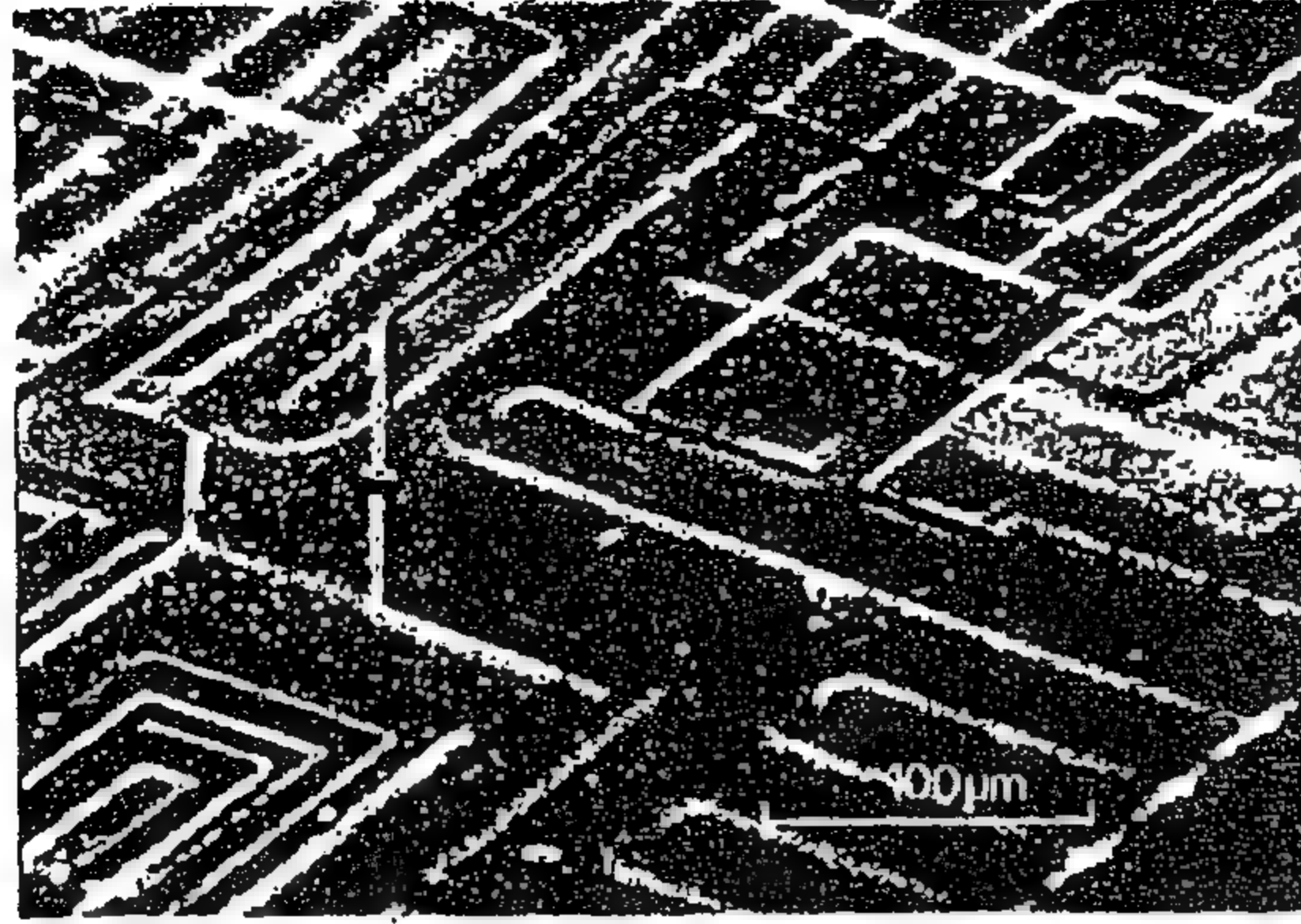
يمكن الحصول على معلومات كمية (Quantitative information) باستخدام انبعاث الكترونيات أوجر (Auger electron emission). إضافة إلى مطياف الأشعة السينية حيث يمكن معرفة التكوين الكيماوي للعناصر الداخلة في تركيب النموذج وبدقة عالية.

٣- دراسة أجهزة الحالة الصلبة وأشباه الموصلات:

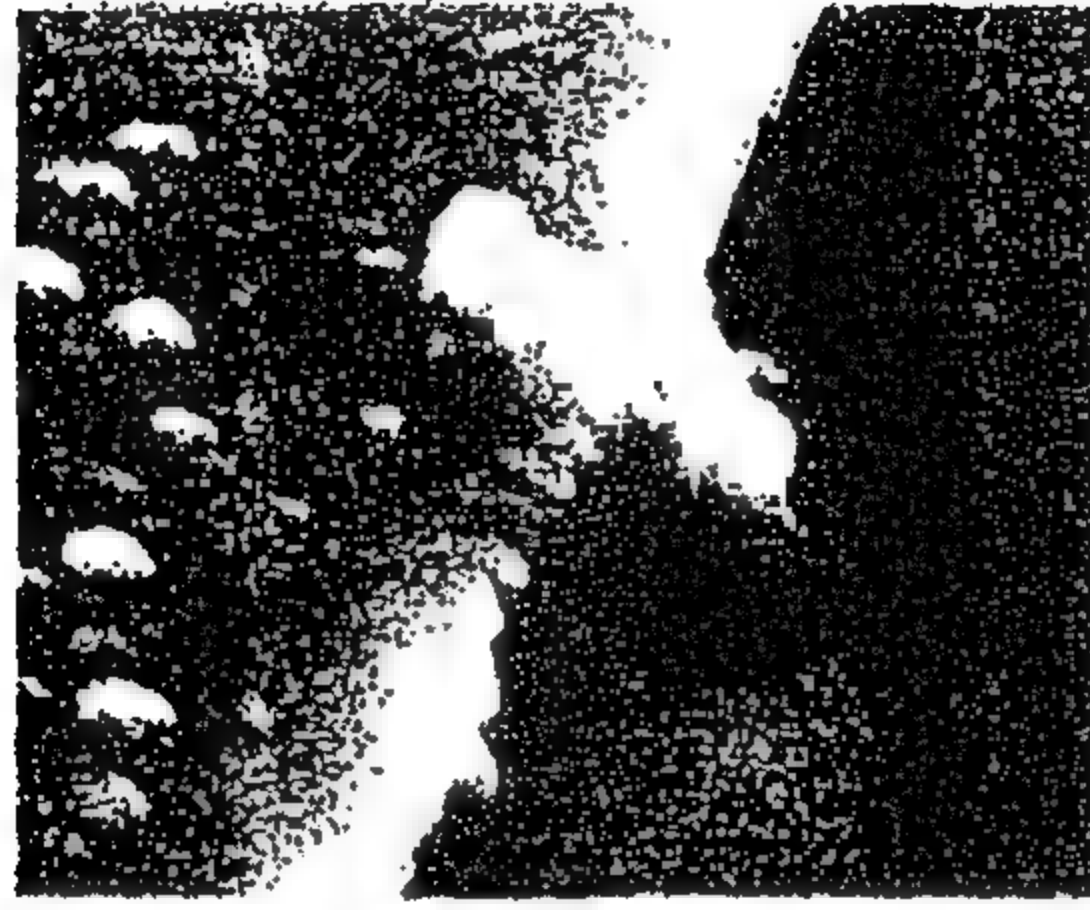
وتتضمن دراسة خواص مواد أشباه الموصلات (Semiconductors) وتحري تقنيات إنتاج الأجهزة وفحص كل أو جزء من الدائرة الالكترونية المراد تشغيلها وملاحظة الخلل أو العيب إن كان موجوداً، كما في الشكل (7-52).

٤- دراسة بعض الظواهر أثناء حدوثها (الدراسة الحركية dynamic study).

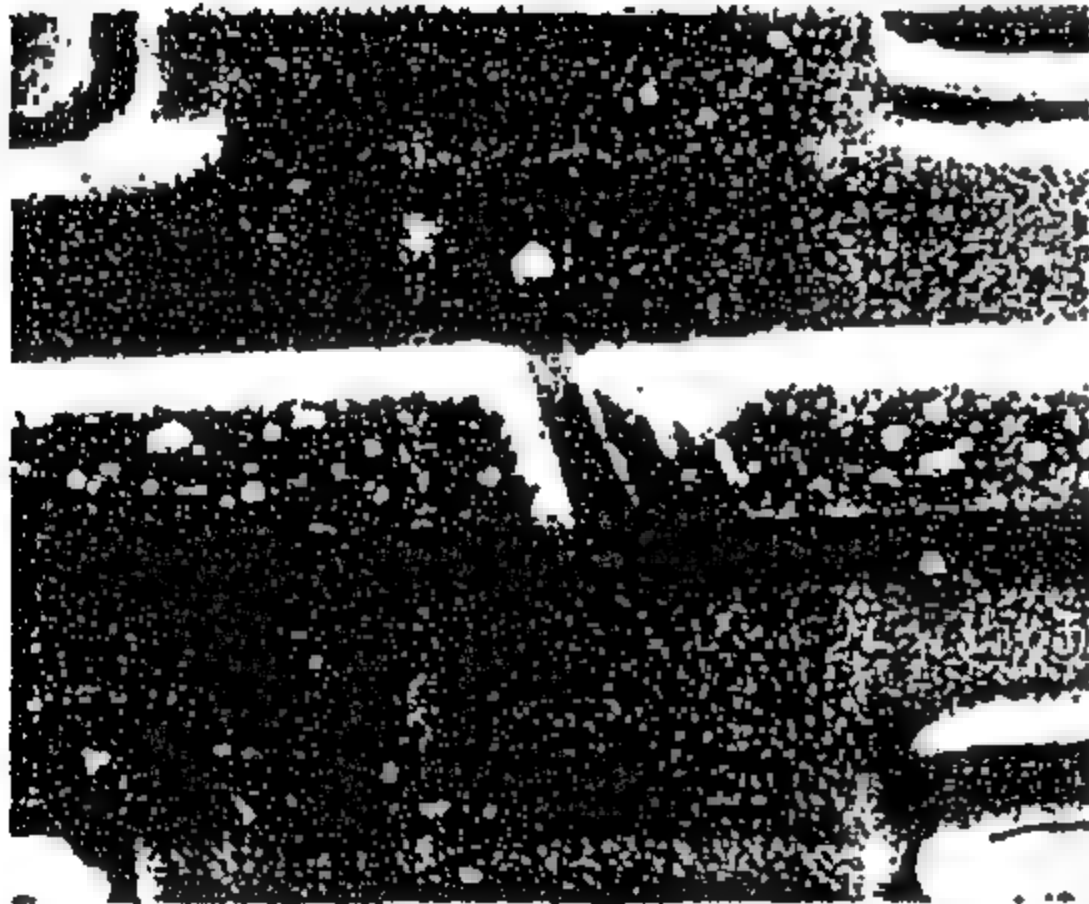
يمكن إجراء بعض التجارب في حجرة نموذج المجهر الالكتروني الماسح (على سبيل المثال التحول الطوري والتبخير وإعادة التبلور وغيرها من الظواهر). وذلك لأن الحيز الواسع نسبياً لحجرة النموذج الموجودة في المجهر تسمح بتسهيلات لإجراء هذه التجارب.



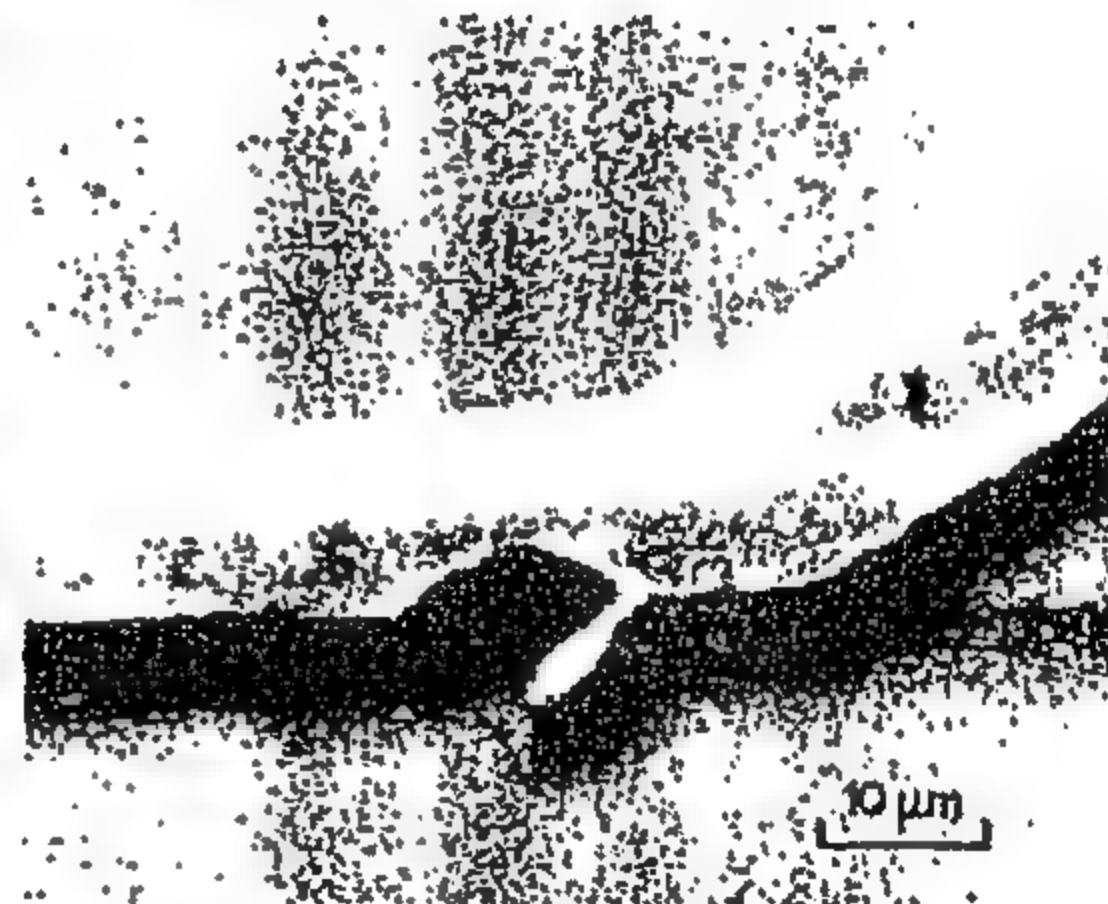
(a)



(b)



(c)



(d)

الشكل (52-7) (a) منظر عام لدائرة الكترونية متكاملة (Integrated circuit) بالمجهر الإلكتروني الماسح إضافة الى انه يبين تفاصيل مختلفة للعيوب التصنيعية (b) اكتنافه على حافة الغشاء (c) تحطم الغشاء و (d) غشاء ذو عرض غير متجانس.

٧-٧ محلل المجس الالكتروني الدقيق (Electron - Probe Micro Analyser)

٧-٧-١ المقدمة:

تتوفر الآن بعض الاجهزة لتحديد وقياس التكوين الكيماوي للمواد الصلبة الصغيرة الحجم او لمناطق صغيرة في النموذج تصل الى $1\mu m^3$. ويمكن عرض التحليل على هيئة صورة تمثل توزيع عنصر محدد في تلك المنطقة بالذات . والأجهزة التي تعتبر مجهرية التحليل (تحلل مناطق صغيرة جداً) هي محلل المجس الالكتروني الدقيق (EPMA) والمجهر الباعث للأيونات الثانوية (Scndary ion emission microscope) ومجهر اوجر (Auger microscope) ومجس الليزر الدقيق (Laser microprobe).

وأهم هذه الاجهزة هو محلل المجس الإلكتروني الدقيق، وهو حالياً الجهاز الوحيد المعول عليه لإعطاء معلومات تحليلية كمية (quantitative) ونوعيه (qualitative) عن النموذج . وهو مصمم بشكل مشابه لتصميم المجهر الإلكتروني الماسح . ويقوم بالتحليل الكيماوي بوساطة قياس الطول الموجي والشدة للأشعة السينية المميزه المنبعثة عندما تضرب حزمة الكترونية عالية الطاقة نموذج صلب. يمكن جعل التحليل مضبوطاً إلى حد $\pm 1\%$ من مقدار العناصر المتواجدة والتي لها عدد ذري اكبر من 12 .

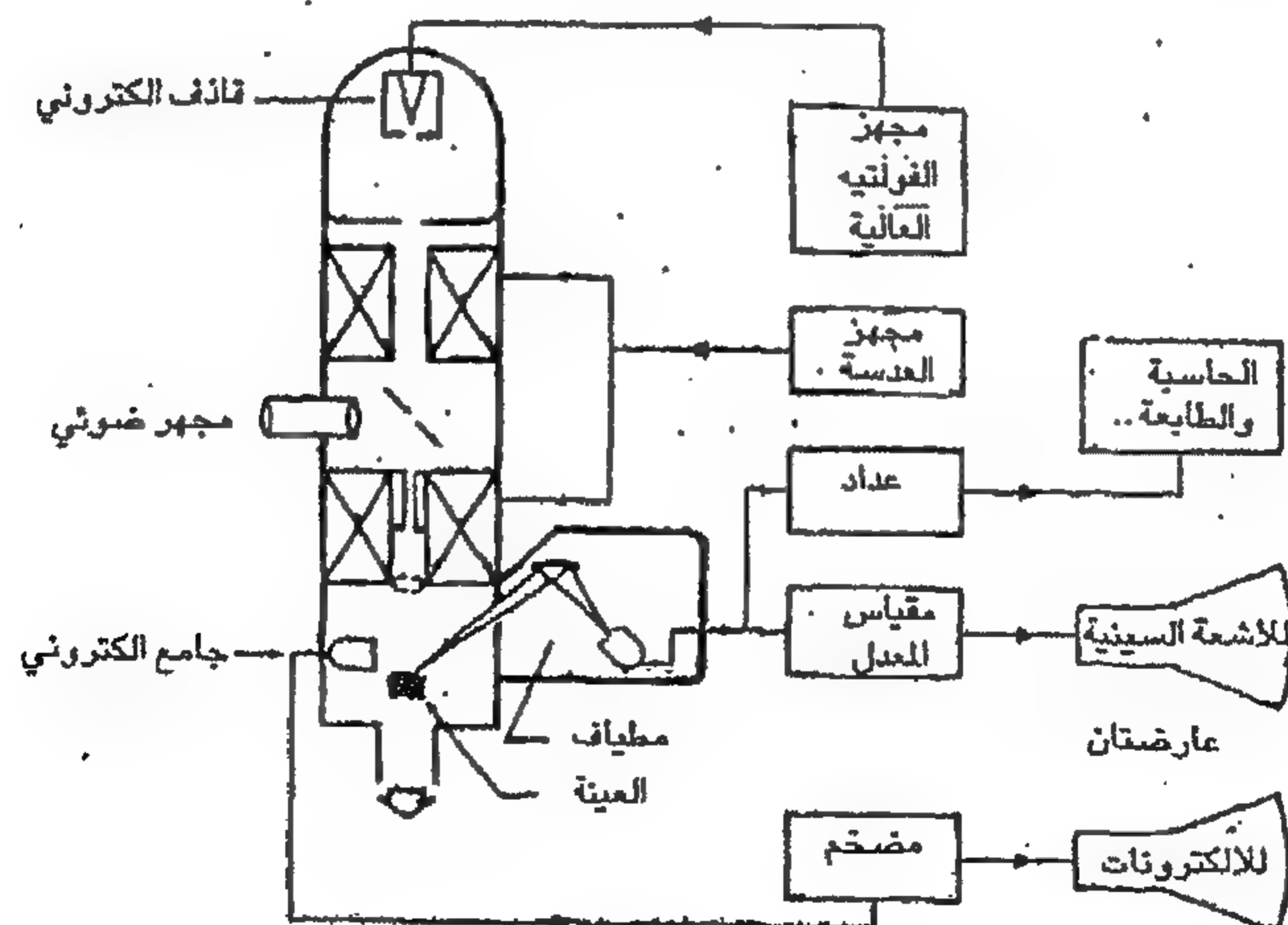
٧-٧-٢ محلل المجس الالكتروني الدقيق:

لقد نُكر للتوان تركيب هذا الجهاز مشابه للمجهر الالكتروني الماسح بشكل عام . إلا أنه يتم الحصول على أحسن النتائج سواء من المجهر الماسح او المحلل الدقيق عند استخدام اجهزة منفصلة لكل على حده . فمطياف للأشعة السينية على المجهر الإلكتروني الماسح وأجهزة مسح لتكوين الصورة في المحلل الدقيق يجعل الجهازين متشابهين . والفرق الطفيف في تصميم الجهازين هي ان المجس الالكتروني الدقيق

يحتاج الى تيار الكتروني عالي واعلى فولتية معجلة ممكنة للحصول على شدة أشعه سينية كافية لتعطي قراءات مضبوطة ولإثارة خطوط اشعة سينية مميزه عالية الطاقة. كما أنه من المحبذ في المحلل الدقيق ان يتم تزويده بتسهيلات لمشاهدة العينه بمجهر ضوئي، على سبيل المثال، خلال عملية التحليل، يضاف الى أنه يجب تصميم هندسة الاشعة السينية ومكان النموذج بشكل جيد لضمان أداء جيد لمطياف الاشعة السينية . إضافة الى أنه من المفضل وضع عدة مطاييف لكل منها زاوية قطع (take off angle) عالية مهما امكن ذلك.

٣-٧-٧ تصميم محلل المجس الالكتروني الدقيق:

يبين الشكل (7-53) رسماً تخطيطياً لجهاز محلل المجس الالكتروني الدقيق . لقد صمم هذا الجهاز ليعطي حزمة الكترونية قطرها ليس أصغر من $0.5\mu m$ (مقارنة مع حوالي $5nm$ في المجهر الماسح). ولذا لا تؤخذ، عادة، احتياطات ضد الاهتزازات والمجالات المغناطيسية الشارده بقدر ما تؤخذ في حالة المجهر الماسح. تكون حدود التفريق الحجمية في التحليل الدقيق بالأشعة السينية حوالي $1\mu m$ بموجب مقدار انتشار الحزمة الإلكترونية تحت سطح النموذج.



الشكل (7-53) رسم تخطيطي لمحلل المجس الإلكتروني الدقيق (EPMA).

يتضمن محلل المجس الدقيق تقليدياً مجهر ضوئي لرؤية المنطقة المراد فحصها من النموذج. والواقع انه إذا أمكن تكوين صورة جيدة بالإلكترونات الثانوية فتنتفي عندئذ الحاجة الى المجهر الضوئي، مع أن المجهر الضوئي يزودنا بتباين بصوري اضافي كتباين التداخل والضوء المستقطب والإضاءة المهيطة والتي تساعد على ربط التحليل الكيماوي مع البنية الدقيقة.

٧-٧-٤ مطاييف الاشعة السينية X-rays Spectrometers

لقد تم التطرق الى ان هناك نوعين أساسيين من المطاييف هما (المطاييف المفرق للأطوال الموجية (WDS) والمطاييف المفرق للطاقة "EDS" ويمتاز كل منهما بالآتي:

يعمل المطاييف المفرق للأطوال الموجية على أساس حيود الاشعة السينية من بلوره احادية معلومة المسافة بين مستويات الانعكاس الذرية ثم تقاس زاوية براك (θ) وشدة الحزم المحادة الممكنة ، ولزيادة قيمة شدة الحزم المحادة فالمطاييف يجب ان :

١- يجمع الاشعة السينية خلال زاوية قطع عالية (35° الى 75°) وذلك لتقليل الامتصاص في النموذج .

٢- يجمع الاشعة السينية خلال زاوية صلبة عالية مهما أمكن .

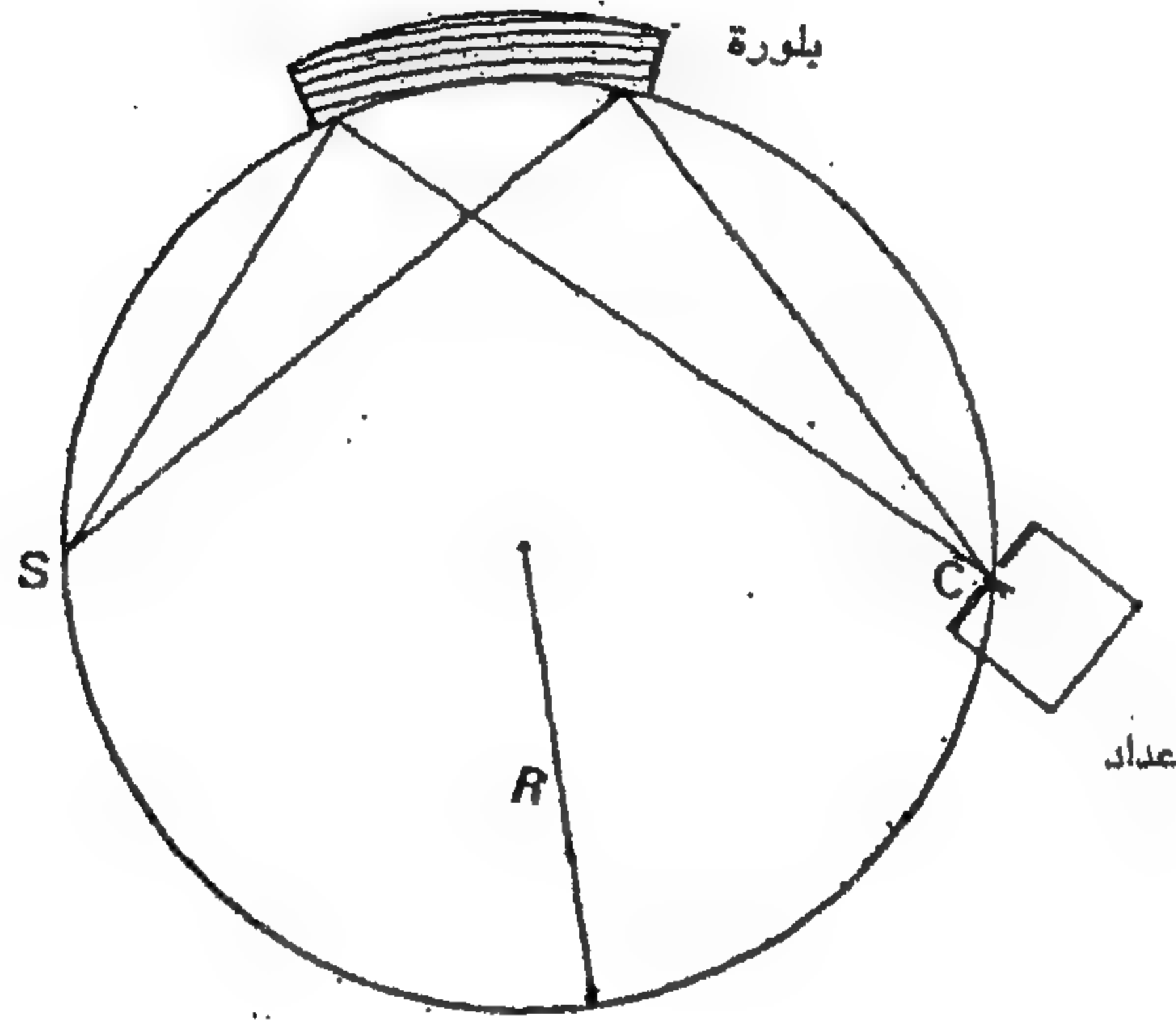
٣- يقلل الفقدان في بلورة الحيود وفي كل الطريق بين النموذج والعداد.

٤- يستخدم عداد كفو لقياس شدة الاشعة السينية.

٥- يكون هناك تضخيم ودقة عاليين في الدوائر الالكترونية المترتبط بها.

ومن المهم زيادة نسبة قمة النبضة الى الأساس او الإشارة الى الضوضاء (noise). ومن الضروري ضمان أن النسبة العالية الممكنة من الاشعة السينية

الداخلية عملياً في المطياف تدخل أيضاً إلى عداد الأشعة السينية بعد الحيود بالبلورة. ويتم تحقيق ذلك باستخدام عملية التبئير الناتجة من الخواص الهندسية الأولية للدائرة وهي أن الزوايا المقابلة لنفس القوس تكون متساوية، وذلك عندما يكون مصدر الأشعة السينية وبلورة الحيود والعداد تقع كلها على محيط دائرة (دائرة رولاند) كما في الشكل (7-54). تتحرك البلورة والعداد حول الدائرة لتحليل أطوال موجيه مختلفة وإذا كان مصدر الأشعة وزاوية القطع ثابتين فيجب تحريك مركز الدائرة أيضاً.



الشكل (7-54) المطياف المفرق للطول الموجي المبئر. (S) مصدر الأشعة السينية والبلورة و (C) وفتحة دخول العداد كلها تقع على محيط دائرة رولاند (Rowland) والتي نصف قطرها R. تكون البلورة منحنية إلى نصف قطر مقداره $2R$ ثم ينعم سطحها إلى نصف قطر مقداره R لتنطبق تماماً على محيط دائرة رولاند.

أما المطاييف المفرقة للطاقة فتعمل على أساس أن طاقة الفوتون E ترتبط مع تردد الموجه الكهرومغناطيسية (ν) كالاتي $E=h\nu$ كما مرّ سابقاً. كما أن التردد له علاقة مع العدد الذري (Z) حسب معادلة موزلي (Moseley's law) $\nu=A(Z-C)^2$ حيث ان C و A ثابتان.

ومن هاتين العلاقتين يمكن ايجاد علاقه بين الطاقة والعدد الذري وعليه فبقياس طاقة فوتونات الأشعة السينيه المميزه يتم تحديد العناصر الداخله في تكوين النموذج. تستخدم عادة كاشفات ذات قدرة تمييز عاليه (تصنع من السيليكون المعالج بالليثيوم) في هذه الاجهزة.

تسقط الفوتونات المختلفه الطاقة الخاصه بطيف الاشعة السينيه المنبعث على الكاشف في آن واحد تقريباً ويجب ان تتم عملية القياس بسرعة لتجنب التشويش . ولذا يمتاز المطياف المفرّق للطاقة في أنه يحل ويعرض أنياً كل الأطوال الموجيه التي تقع ضمن مدى تحسس الكاشف. يمتلك كاشف السيلكون أنف الذكر (قطره من 5 الى 25mm) كفاءة عاليه جداً في جمع الأشعة السينيه حيث يمكن وضعه قريباً جداً من النموذج ليتم جمع الأشعة بزواويه صلبه عاليه. والشئ الأساس غير المرغوب به في هذا الكاشف هو أنه يجب ان يحفظ باستمرار عند درجة حرارة منخفضه جداً (في درجة غليان النيتروجين المسال -196°C) لانه يقلف عند درجة حرارة الغرفة. لقد طوّرت الآن بعض الكواشف بحيث أنها يمكن أن تبقى من دون تلف عند درجة حرارة الغرفة ولكن لاتعمل إلا عند درجة غليان النيتروجين المسال

وفي الحقيقه فإن نوعي المطاييف المذكورين يكمل احدهما الآخر. فيستطيع المطياف المفرق للطاقة انجاز ثلاثة أشياء لايمكن تحقيقها في حالة المطياف المفرق للطول الموجي وهي:

١- الحصول على الطيف بسرعة عاليه جداً.

٢- الحصول على النتائج المفيدة عند تيار حزمه الكترونية منخفض (وهذا ضروري بالنسبة للنماذج القابلة للكسر).

٣- الحصول على التحليل من النماذج الخشنة السطوح.

ومن ناحية اخرى يمتلك المطياف المفرق للطول الموجي دقة وقدرة تمييز عاليتين مع حدود كشف واطئة اضافة الى أداء أفضل مع العناصر الخفيفة. يعتمد اذن اختيار المطياف على نوع التطبيق. فللمطياف المفرق للطول الموجي امكانية افضل للتحليل في حين ان المطياف المفرق للطاقة يعطي معلومات تحليلية مستمرة تساعد في دراسات أخرى او عندما تكون النتائج المطلوبة شبه كمية . ولذا كان الاختيار الافضل هو المطياف المفرق للطاقة كجزء تكميلي مع المجهر الالكتروني الماسح. أما المحلل الدقيق فيشتمل عادة على عدة مطاييف مفرقة للأطوال الموجية مع آخر مفرق للطاقة ايضاً لان الاخير يعطي نتائج اولية سريعة عن النموذج المراد تحليله.

٥-٧-٧ التحليل الكمي بمحلل المجس الالكتروني الدقيق:

ان الطريقة الاعتيادية للتحليل الدقيق هي مقارنة معدل العد لعنصر معين اولاً من مساحة معينه على النموذج المراد تحليله مع نموذج قياسي من عنصر نقي او مع سبيكة معلومة التكوين الكيماوي بصوره مضبوطة. وسيكون القياس العملي هونسبة الشدة بين النموذج المراد تحليله الى النموذج القياسي. والحصول على دقة عالية في قياس نسبة شدة الاشعة السينية المميزة يجب تفادي او استثناء بعض مصادر الخطأ كعدم الاستقرار في الفولتية المعجلة وزحف (حركة) المطياف او زحف مرحلة النموذج الى ما سوى ذلك.

كما يجب مراعاة العوامل التصحيحية للقيم التجريبية لنسبة الشدة بسبب بعض المؤثرات الفيزيائية المنفصلة وهي:

١- تصحيح العدد الذري: ويتكون من قسمين:

أ- التصحيح الخاص بالإلكترونات المنعكسة:

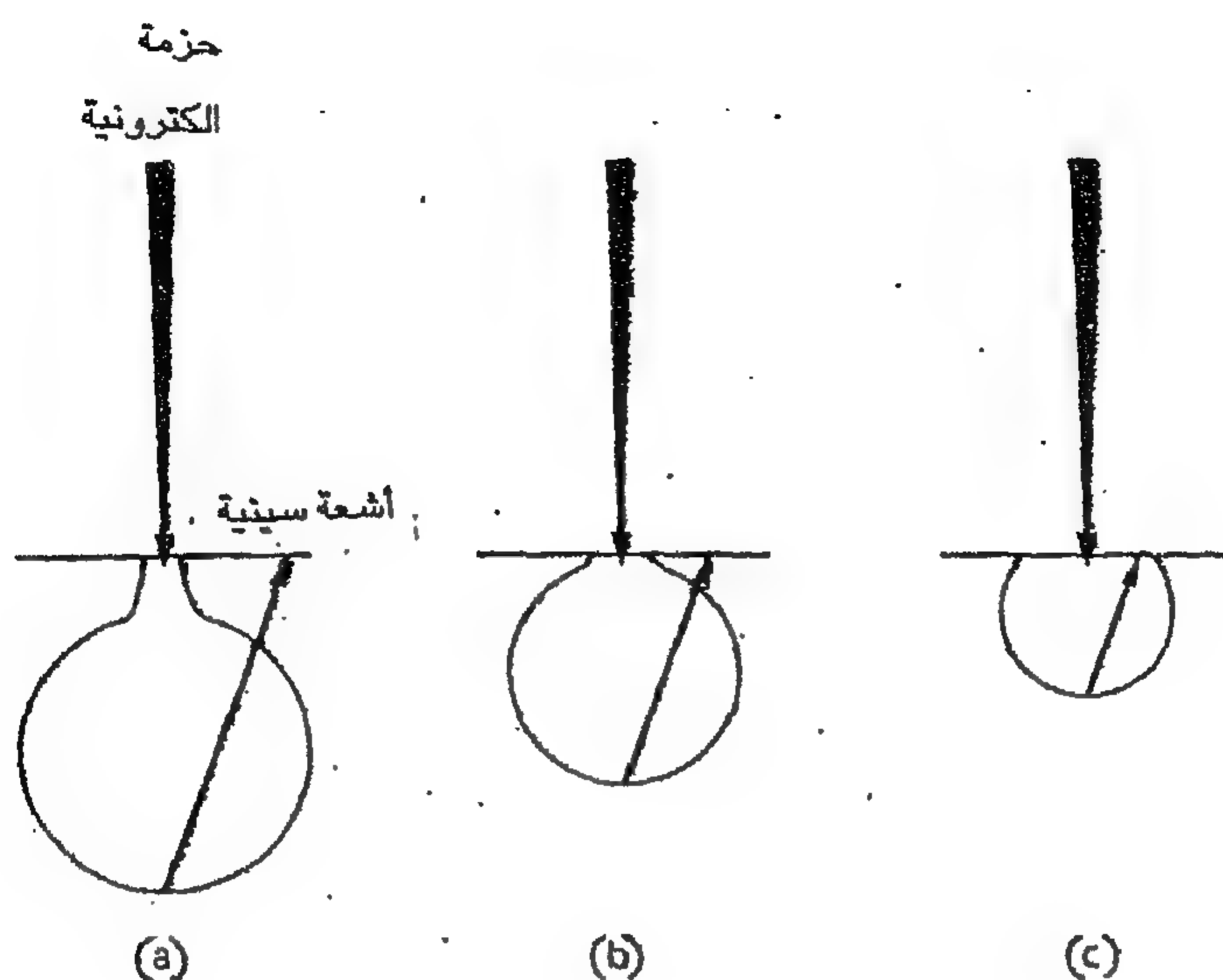
ينعكس قسم من الإلكترونات الساقطة عن سطح النموذج ولذا لا يستطيع توليد أشعة سينية في النموذج. يزداد مقدار الإلكترونات المنعكسة بزيادة العدد الذري للنموذج ومن ثم فهو يتناسب مع معدل التكوين الكيماوي له.

ب- تصحيح توقف القدرة stopping power correction :

يتعلق هذا العامل بكفاءة توليد الأشعة السينية وكذلك بالعدد الذري للنموذج . فيكون معدل مدى الإلكترون أكبر في العنصر الخفيف إلا أن طاقة التأين بوحدة الكتلة تكون عالية أيضاً وهكذا يكون إجمالي توليد الأشعة السينية أقل.

٢- تصحيح الامتصاص Absorption Correction :

تتولد الأشعة السينية عند أعماق مختلفة من سطح النموذج خلال حجم منطقة التفاعل . فتعتمد الشدة الخارجة من النموذج على مقدار الامتصاص الذي تعانيه خلال مرورها حتى بلوغها سطح النموذج . وهذا بدوره يعتمد على حجم منطقة التفاعل (بين الحزمة الإلكترونية الساقطة والنموذج) وعلى امتصاص مادة النموذج ، لذلك فهي تتغير مع معدل التكوين الكيماوي والطول الموجي للأشعة السينية المراد التقاطها، يبين الشكل (7-55) توليد الأشعة السينية وعلاقته بعمق منطقة التفاعل وطول طريق الامتصاص . يعتمد طول طريق الامتصاص على زاوية القطع للمطياف أيضاً.



الشكل (7-55) رسم تخطيطي لتوليد الأشعة السينية كدالة للعمق. (a) عنصر له عدد ذري واطئ (b) سببكه لعنصرين من (a) و (c)، (c) عنصر له عدد ذري عال. تبين السهام مسارات الامتصاص للأشعة السينية المنبعثة باتجاه المطياف.

٣- تصحيح التآلق المميز Characteristic fluorescence correction :

يمكن توليد الأشعة السينية من أشعة سينية أخرى كما يمكن توليدها بالقذف الإلكتروني. ينتج خط الأشعة السينية المميزة من قبل الحزمة الأساسية ومن قبل أي خط من الخطوط المميزة المنبعثة من العناصر الأخرى الموجودة في النموذج إذا كانت طاقته تكفي لذلك. يعتمد مقدار هذا التأثير على التكوين الكيماوي للنموذج.

يمكن اختصار مجمل التصحيح الذي يلزم أن يطبق بالآتي:

$$C_A = \bar{Z} AF \quad \dots\dots\dots (31-7)$$

حيث يمثل \bar{Z} معدل العدد الذري.

C_A معامل التصحيح الكلي.

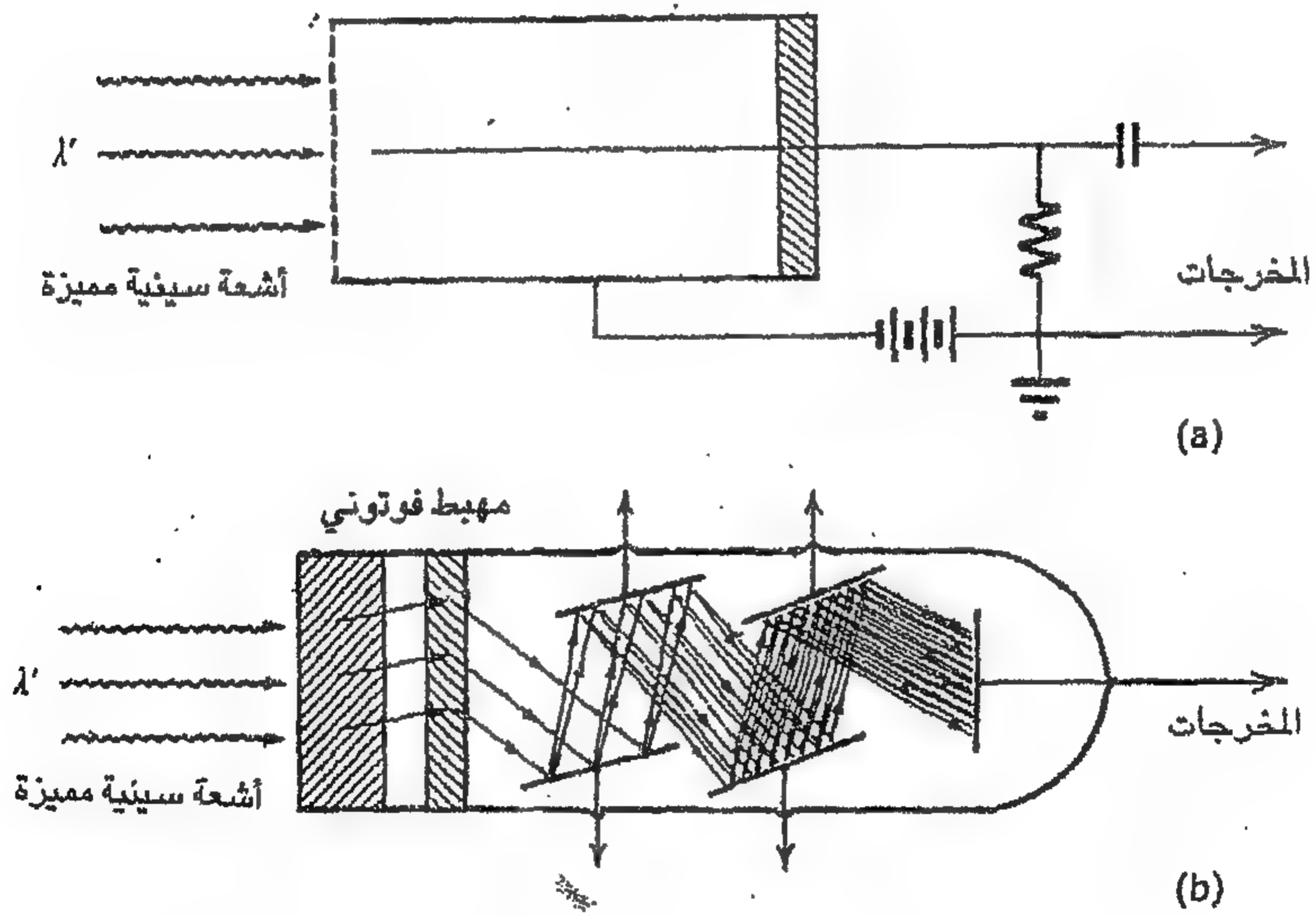
A هو تصحيح الامتصاص.

F هو تصحيح التآلق (تآلق الاشعة السينية).

ان تطبيق العلاقة (31-7) ليس بالأمر السهل لكنه يمكن أن تطبق بسهولة باستخدام برنامج الحاسب الالكتروني وهو متوفر في المصادر ذات العلاقة.

٦-٧-٧ العدادات وكشف الإشارة Signal detection And counters :

يتشابه كشف الاشعة السينية وقياس شدتها في محلل المجس الالكتروني الدقيق لكل الاغراض العملية مع التقنية القياسية المستخدمة في حيود الاشعة السينية وتحليل طيفها. تعتبر الاصناف الاساسية للكواشف بشكل عام من نوع العدادات التناسبية (proportional counters) ومن ضمنها النوع الغازي من العدادات التناسبية والعدادات الومضية او الكواشف المضاعفة للفوتونات كما موضحة في الشكل (56-7).

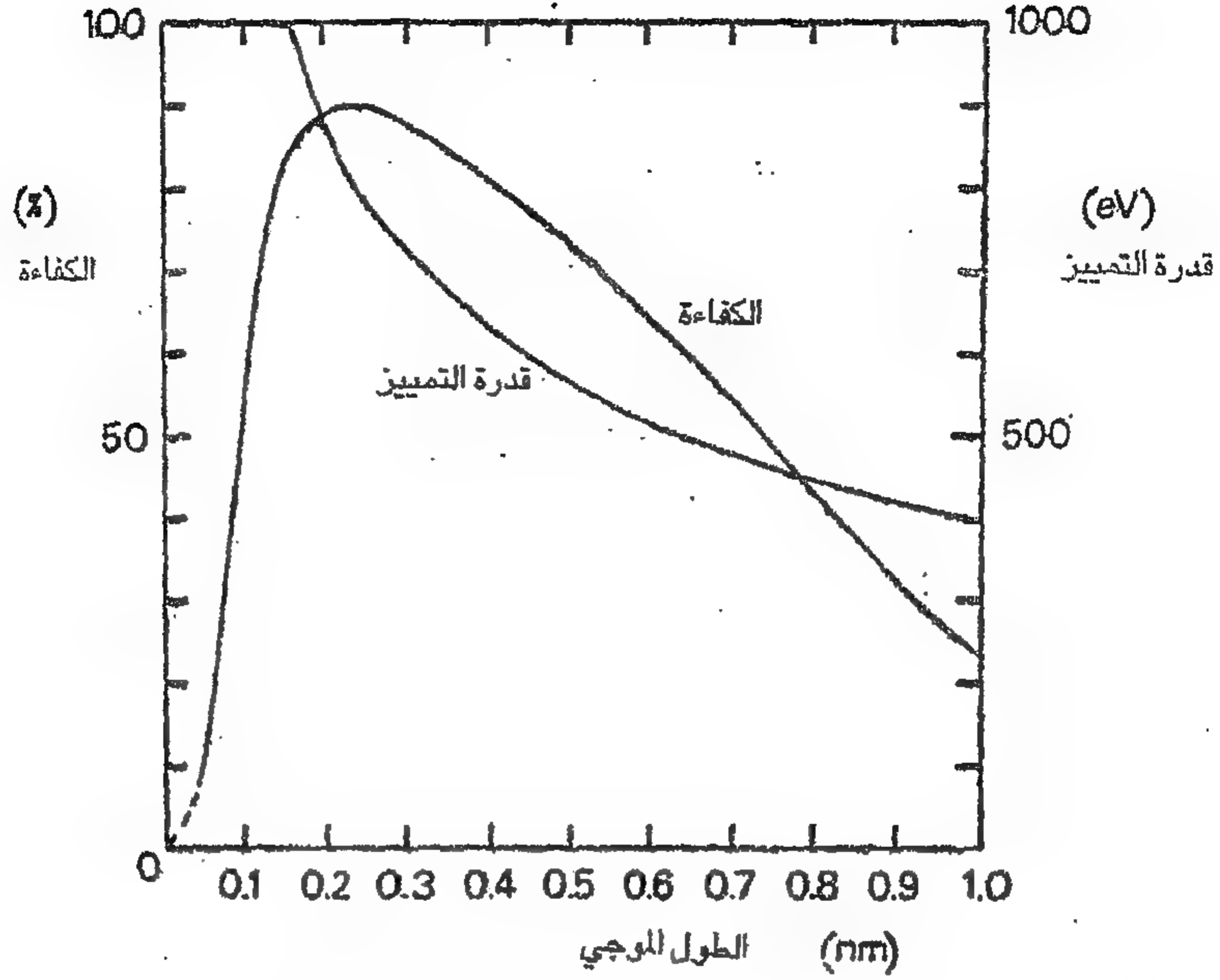


الشكل (56-7) مخططات لكاشفي الاشعة السينية (a) كاشف الحجرة المتأينة (b) كاشف المضاعف الفوتوني الومضي.

يُستخدم العداد التناسبي بصورة دائماً تقريباً في المطاييف المفرقة للطول الموجي. وهو ببساطة نسخة مطوّرة من عداد كايكر (Geiger counter) والذي تتعجل فيه أزواج الالكترين - ايون المتولده في الغاز الموجود (آركون او كزنون) نحو جدار حجرة العداد بفولتية مناسبة وبذلك تحصل نبضة فولتية. يتشابه هذا الأساس مع أساس عمل كاشف الحالة الصلبه المستخدمة في المطاييف المفرقة للطاقة. تكون الفولتية المعجلة في عداد كايكر عالية بحيث ان كل الايونات تتحرك نحو جدران حجرة العداد وبذلك تولد تأين اضافي ضخم. يؤدي هذا الى نبضة قوية جداً والتي يمكن ان يتم كشفها بسهولة. إلا أنها يجب أن تُخمد قبل ان يمكن استلام نبضه أخرى (يتم ذلك إما بتخفيض الفولتية او بوجوب بعض المضافات في الغاز المستخدم).

يختلف العداد التناسبي عن عداد كايكر أساساً في ان الفولتية المعجلة اقل بكثير مما في عداد كايكر. فيتم الحصول على تأين اضافي اقل ومن ثم تنتج نبضه اضعف، إلا أن النبضه الآن تتناسب مع طاقة الفوتون الابتدائية وتُخمد بسرعة أكبر بحيث ان الزمن الميت (dead time)، وهي الفترة الزمنية التي يكون فيها العداد غير حساس، للعداد التناسبي هو حوالي 200nS مقارنة مع 50μS او أكثر لعداد كايكر.

إن كفاءة العد وقدره التمييز للعداد التناسبي تعتمد على الطول الموجي كما مبين في الشكل (7-57) ان هذين المنحنيين موافقان للعداد المملوء بالكزنون إلا أنها تعتمد بشكل رئيس على الغاز المالىء والامتصاص الذي يحدث في شبك العداد والتصميم وأخيراً الفولتية العاملة للعداد. يمكن استخدام الجريان المستمر للغاز في حالة معدلات العد العالية جداً، حيث يعطي هذا اخماداً سريعاً جداً للنبضة بصورة فعّاله وذلك بإزالة الغاز المتأين ميكانيكياً.



الشكل (7-57) صفات العداد التناسبي: كفاءة العد و قدرة التمييز كدالتين للطول الموجي. المنحنيان مناسبان للعداد المملوء بغاز الكزنون (Xenon) حيث تعتمد بشدة على نوعية الغاز المالى والامتصاص في الشباك والتصميم وعلى الفولتية المعجلة للعداد. يمكن ان يحسن اداء العداد في حالة الطول الموجي الطويل، باستخدام الاركون بدل الكزنون واستخدام شبك خفيف جداً او حتى عداد بلا شبك.

تولد العدادات الومضية ايضاً نبضة تتناسب مع طاقة الفوتون الابتدائية ، فهي بذلك تتشابه من حيث الاساس بالكاشف المستخدم في المجهر الالكتروني الماسح حيث تتضمن بلوره ومضيه (حساسه للفوتونات في مدى طيف الاشعة السينية بدلاً من الالكترونات) اضافة الى مضاعف الفوتونات. فهي كفؤه جداً ويمكن أن تكون ملائمة للعد افضل، حتى عند معدلات اعلى، من العدادات التناسبيه الا ان ادائها ينخفض بصورة ملحوظة عند الاطوال الموجيه الاكبر من حوالي 200 pm (2\AA) ولذا فهي لا تستخدم عادة في المطاييف المفرقة للطول الموجي . وهي في

الاساس تستخدم في مطياف اشعة كاما وفي حيود الاشعة السينية (لأن الطول الموجي هو في الغالب اقصر من (200 pm) فهي مثالية في مراقبة الحزم المحادة عند ضبط البلوره لدراسة البنى الداخليه للنموذج بوساطة الاشعة السينية . يعتمد العداد الومضي (Scintillator) على الاثارة المتألقة المرئية للأشعة السينية عند اصطدامها بمواد معينه . تتضمن هذه التقنية ببساطه مضاعفة الفوتونات المنبعثة من البلوره وذلك باخراج الكترون فوتوني من المهبط الفوتوني (photo cathode) (على سبيل المثال المركب الكيماوي المعدني لمعدني السيزيوم / الانتيومون).

٧-٧-٧ تطبيقات محلل المجس الالكتروني الدقيق:

يمكن ادراج اغلب التطبيقات العلميه والصناعيه للتحليل الدقيق للمواد تحت ثلاثة عناوين:

أ- دراسة عمليات الانتشار.

ب- دراسة وتمييز التحولات الطورية.

ج- تعيين وتحديد الشظايا الصغيرة والأطوار.

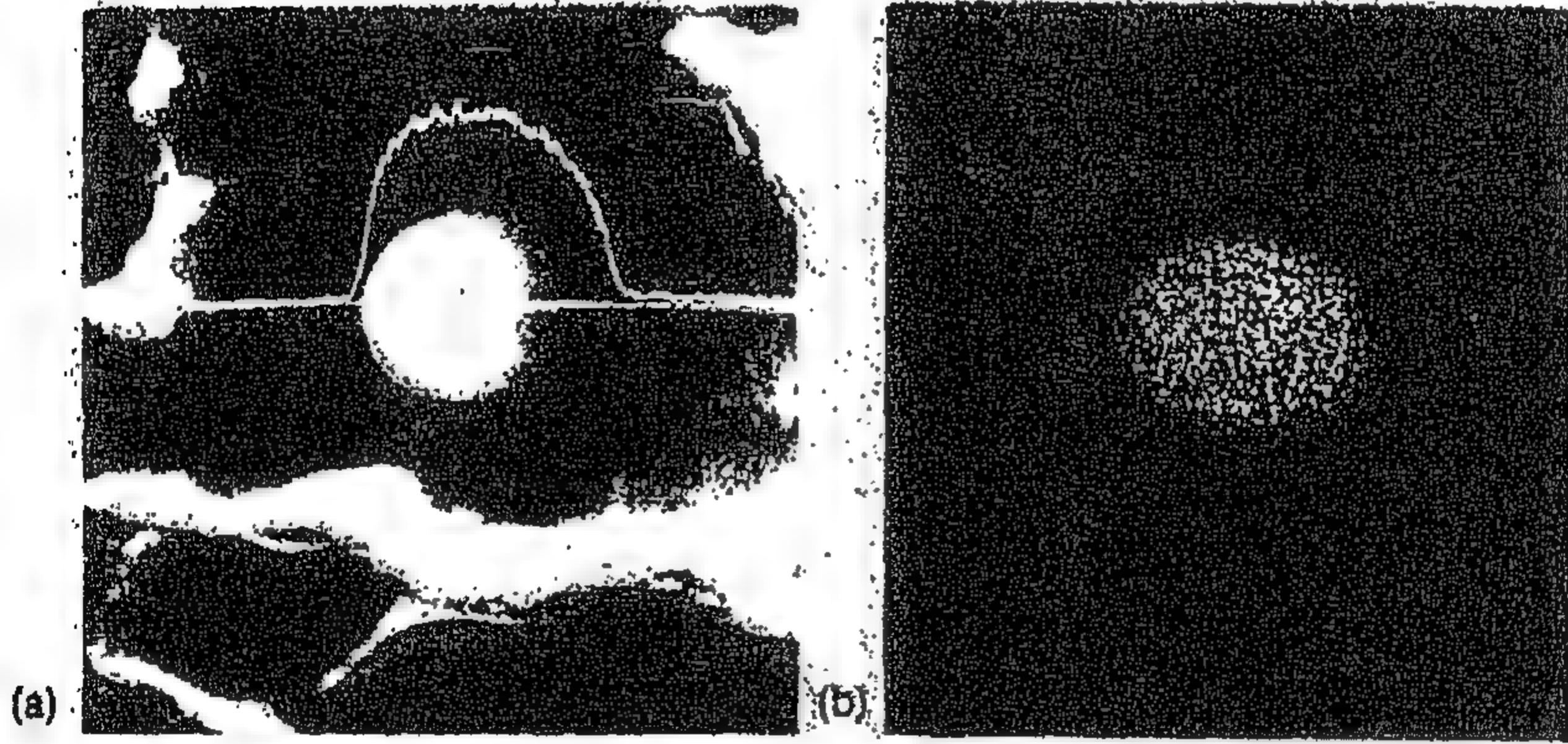
وحيث ان الانتشار هو أحد العمليات الاساسية الداخلة في عمليات الانتاج والمعاملات الحرارية للمواد، فدراسته بتقنية التحليل الدقيق تشكل احدى التطبيقات الصناعية المهمة، الى جانب الاستخدامات الواضحة كالتأكد من ان عملية التلدين أدت بالفعل الى تجانس السبيكة ام لا . وهناك تطبيقات تعتمد بشكل رئيس على الطبيعة المجهرية للتحليل كدراسة روابط الانتشار الرقيقة لطبقة الطلاء الخفيفة او تلك التي بين الألياف والمادة الاساس في المواد المركبة (Composites) وكيفية تحطمها عند درجات الحرارة العاليه.

تمثل المخططات الطورية المضبوطة الإداة المساعده الاساسية للمعرفة الشاملة للبنى المجهرية للمواد الصلبه التي قد تكون معادن او خزفيات او بوليمرات او خامات معدنيه.

تزيد طرائق التحليل الدقيق بشكل كبير سرعة تعيين المخططات الطوريه . فيمكن استخدام نموذجاً واحداً لتعيين الحدود لكامل منطقة الطورين في سبيكة ثنائية ، فيتم تلدين النموذج عند درجات حرارية مختلفة ويتم اخماده ثم يُحلل بعد كل عملية

تلدین . يؤدي تعیین التكوين الكيماوي لكل طور موجود اليأ الى معرفة التكوينات الكيماوية لنهايات خطوط الربط (Tie - Lines) عند تلك الدرجة الحرارية .

يعتبر تحليل وتحديد الاكتنافات الصغيرة في المواد من أكثر الاستخدامات الصناعية للمجس الدقيق لان وجود مثل هذه الاكتنافات يدل على وجود بعض المشاكل في عملية الانتاج والتي يمكن ان يتم حلها بتحديد ماهية هذه الاكتنافات (in- clusions) . وفي بعض الاحيان قد تؤثر هذه الاكتنافات على خواص المادة، على سبيل المثال، تخفّض متانة الكسر (fracture toughness) . يبين الشكل (7-58) سطح مكسر فولاذ يتضمن واحده من الاكتنافات مع تحليلها . ومع ان دراسة الاكتنافات في المعادن وخصوصاً الفولاذ قد أخذت مجالاً واسعاً من البحث والدراسة، إلا أن نفس المشاكل قد تحدث في مواد أخرى ، على سبيل المثال، اكتنافات ثاني اوكسيد التيتانيوم في الياف النايلون .



الشكل (7-58) سطح مكسر فولاذ فيه واحده من الاكتنافات (أبعادها $3 \times 4 \mu m$) في مساحة ذات انهيـار مطيلي (a) تمثل صورته بالإلكترونات الثانوية إضافة الى «ماسح خطي» حيث تمسح الحزمة الالكترونية الاكتنافة على طول هذا الخط الأفقي اما الخط غير المنتظم فيمثل عرضاً لشدة خط الأشعة السينية المميزة $MnK\alpha$ المنبعث عبر الاكتنافة . أما (b) فهي صورة بالأشعة السينية المميزة $MnK\alpha$ المنبعثة من هذه المنطقة والتي تؤيد ان المنغنيز هو أحد المكونات الرئيسة للاكتنافة كما تبين توزيع عنصر المنغنيز خلال هذه المنطقة من النموذج .

وإذا كانت الترسيبات صغيرة جداً بحيث أن الأشعة السينية سوف تنبعث من الدقيقة (الجسيم) والمادة الأساس التي تحتها، عند سقوط الحزمة الالكترونية عليها، فيمكن في هذه الحالة استخدام تقنية طبعة الاستخلاص آنفة الذكر ففي ذلك الحل الامثل .

وفي العديد من الحالات يُعد الحصول على التحليلات الكيماوية غير كافٍ بحد ذاته فمعلومات حول التركيب البلوري تكون ضرورية وذلك يتطلب نقل النموذج الى المجهر الالكتروني النافذ للحصول على نمط حيود الالكترونات لتكتمل المعلومات . وأحسن جهاز يفي بالغرض في هذه الحالة هو مجهر الكتروني نافذ فيه محلل الكتروني دقيق (transmission electron microscope and micro-analyser) . وعندئذ يمكن الحصول على التحليل الكيماوي الكمي ونمط حيود الالكترونات لجسيمات صغيرة تصل الى 100nm أو أقل من ذلك .

هناك أيضاً العديد من تطبيقات التحليل الدقيق التي ليس لها علاقة بدراسة المواد مثل التطبيقات في حقل علوم الحياة والبحوث الجيولوجية والدراسات البيئية كتحليل دقائق الملوثات الجوية والدراسات الجنائية التي تتضمن تحديد ومقارنة القطع الصغيرة للمواد كقطع الاصباغ او الشعر وسواها .

٧-٧-٨ خاتمة:

ان جميع أنواع المجاهر الالكترونية ومنها TEM و SEM وما يتعلق بها كتبثير الصورة ووضوحها او تقليل اللابؤرية او الانتقال من المجال المضيء الى المجال المظلم وغير ذلك من امالة العينه او تدويرها او رفعها او تحليلها كيميائياً الى غير ذلك من العمليات الخاصة بالمجهر الإلكتروني كل ذلك قد تمت السيطرة عليه بالحاسوب (computer) . ان فالمجاهر الالكترونية الآن كاملة الحوسبة (fully computer-ised) اي تتم السيطرة على جميع العمليات بشكل دقيق جداً وباستخدام البرامجيات (soft ware) الملائمة .

تمارين الفصل السابع - القسم الثاني -

- ١- قارن بين المجهر الإلكتروني النافذ والماسح والمجهر الضوئي العاكس.
- ٢- ماهي أهم تطبيقات وميزات المجهر الإلكتروني الماسح في حقل هندسة المواد.
- ٣- ماهي آليات التباين الصوري في المجهر الإلكتروني الماسح. اشرح واحدة منها.
- ٤- اشرح باختصار كيف يتم التحليل باستخدام محلل المجس الإلكتروني الدقيق.
- ٥- لماذا يصعب تحليل العناصر ذات العدد الذري المنخفض (أقل من 12) بصورة كمية.
- ٦- ماهي أهم تطبيقات محلل المجس الإلكتروني الدقيق.
- ٧- هل توجد عدسة شبيئية في المجهر الإلكتروني الماسح ولماذا؟
- ٨- ارسم مخططاً لجهاز المجهر الإلكتروني الماسح مبيناً عليه أهم الأجزاء.
- ٩- ماهي الشروط الواجب توافرها في النموذج المراد فحصه بالمجهر الإلكتروني الماسح، وكيف يتم تحقيقها فيه.
- ١٠- ماهي التقنية المستخدمة لدراسة:
 - أ- تضاريس سطح نموذج مكسور وآلية الكسر.
 - ب- توزيع عنصر الفناديوم، ومقداره في فولاذ منخفض السبيكة (Low alloy steel).
 - ج- كثافة الانخلاعات في نموذج من النحاس مشوه 20% بالشد.
 - د- المسافات بين المستويات الذرية في بلوره من الألمنيوم.

الفصل الثامن

الميتالوغرافيا الكمية «ستيريولوجي»

Quantitative Metallography "stereology"

٨-١ المقدمة:

لا شك في ان للبنية الدقيقة (microstructure) الدور الكبير في تحديد خواص المادة ان لم تعتبر مرآة لها . فعلى سبيل المثال فإن عدد الترسبات او حجمها او توزيعها له أثر كبير على مقاومة المادة. كما ان كثافة الانخلاعات والحجم الحبيبي والعيوب النقطية وغير ذلك من العوامل البنيوية تلعب دوراً كبيراً في تحديد الخواص.

ولهذا كان حساب هذه العوامل بدقة وتعيين مقاديرها بشكل مضبوط اي بدون انحياز (bias) نحو قيمة اعلى او اقل من المقدار الحقيقي له اهمية كبيرة لأن ذلك ينعكس على خواص المادة ومن ثم على استخدامها. وبناءً على ذلك تطور علم الميتالوغرافيا الكمية او ما يسمى بعلم قياس الاحجام او المجسمات (stereology) .

تعرف الميتالوغرافيا الكمية بأنه فن حساب المعالم (parameters) كنسبة الطور الثاني ومعدل الحجم والمسافة البينية وعدد الدقائق للطور المبعوث في مادة غير متجانسة كل ذلك يتم من المشاهدات المجهرية لمقطع مستو من نموذج محضّر بصورة ملائمة.

فالنتيجة ان عرضة لتغيرات احصائية واطء لان هذه المشاهدات تتم لمساحات سطحية محدوده ولنماذج قليلة العدد اضافة الى أن هناك أخطاء تجريبية في كل من عمليتي تحضير النموذج والقياسات العملية.

٢-٨ أسس وقواعد الفحص :

بما ان المعالم المحدده بالميتالوغرافيا الكمية هي مقادير بعديه مثل الحجم والمساحات والمسافات التي تتعلق بالطور الموجود فعلاً، فهناك ، بناءً على ذلك، تحديدات ضرورية لتجنب الانحياز سلباً او ايجاباً وهي:

- ١- يجب ان يكون مقطع النموذج مستوٍ ومسطح.
 - ٢- قد لا تستخدم الشبكة المنتظمة او الخطوط المنتظمة للحساب في بنية النموذج المنتظمة عندما تكون المسافات بين الخطوط متقاربة في القياس مع التفاصيل البنيوية. ولا يؤدي استخدام الخطوط او الشبكة المنتظمة في استقراء البنى غير المنتظمة الى الانحياز.
 - ٣- يجب ان يكون مقطع النموذج والمجال المجهرى له او مكان الشبكة او الخطوط غير منحاز وممثلاً لمادة النموذج. ان الوضع العشوائى للشبكة في الاماكن المحدده هي التي تكون أكثر تمثيلاً في العادة.
 - ٤- لا يؤثر شكل شبكة النقاط او صفوف الخطوط والمسافات التي بينها وقوة تكبير الجهاز على الانحياز عند تعيين قيمة الكسر الحجمي إلا أنها تؤثر في دقة القياسات.
- ومن الضروري عند تطبيق قواعد الميتالوغرافيا الكمية تعيين ماهي المعالم التي يجب ان تقاس. تتضمن هذه القياسات عادة الكسر الحجمي للأطوار او المكونات والحجم البلوري والمسافة بين الطبقات والمسافة بين الترسبات ودرجة التكوير وعمق الكربنه وكثافة الانخلاعات وكثافة المسامات وغيرها من المعالم.
- يجب مراعاة ما يأتي عند تطبيق هذه الطريقة او تلك:
- ١- تحديد ماهية معالم البنية الدقيقة التي لها علاقة بظروف الخدمة المتوقعة او متطلبات الخواص.

- ٢- الى اي مدى يمكن اظهار هذه المعالم وقياسها.
 - ٣- ماهي أكفاً وأضبط طريقة قياس .
 - ٤- هل التقنية اليدوية ام الآلية يمكن تطبيقها لتسهيل التحليل .
 - ٥- كم عدد النماذج الواجب قياسها واين أخذت النماذج من بين دفعات الانتاج واي اتجاه يجب ان يفحص .
 - ٦- كيف يتم تحضير النموذج.
 - ٧- ماهي قدرة التكبير المستخدمة.
 - ٨- كم عدد المجالات التي يجب ان تقاس لكل نموذج.
 - ٩- كيف يجب ان تحلل المعلومات ويعبر عنها.
 - ١٠- ماهي الاستنتاجات التي يمكن استخلاصها.
- وسيتم التطرق هنا الى بعض المعالم المهمة في الميتالوغرافيا الكمية وكيفية قياسها:

٣-٨ الكسر الحجمي (Vv) Volume fraction

يُعرف الكسر الحجمي بأنه نسبة حجم كل الطور الثاني (طور الفأ، على سبيل المثال، الى حجم النموذج نفسه ويعبر عنه عادةً إما بكسر عشري أو نسبة مئوية.

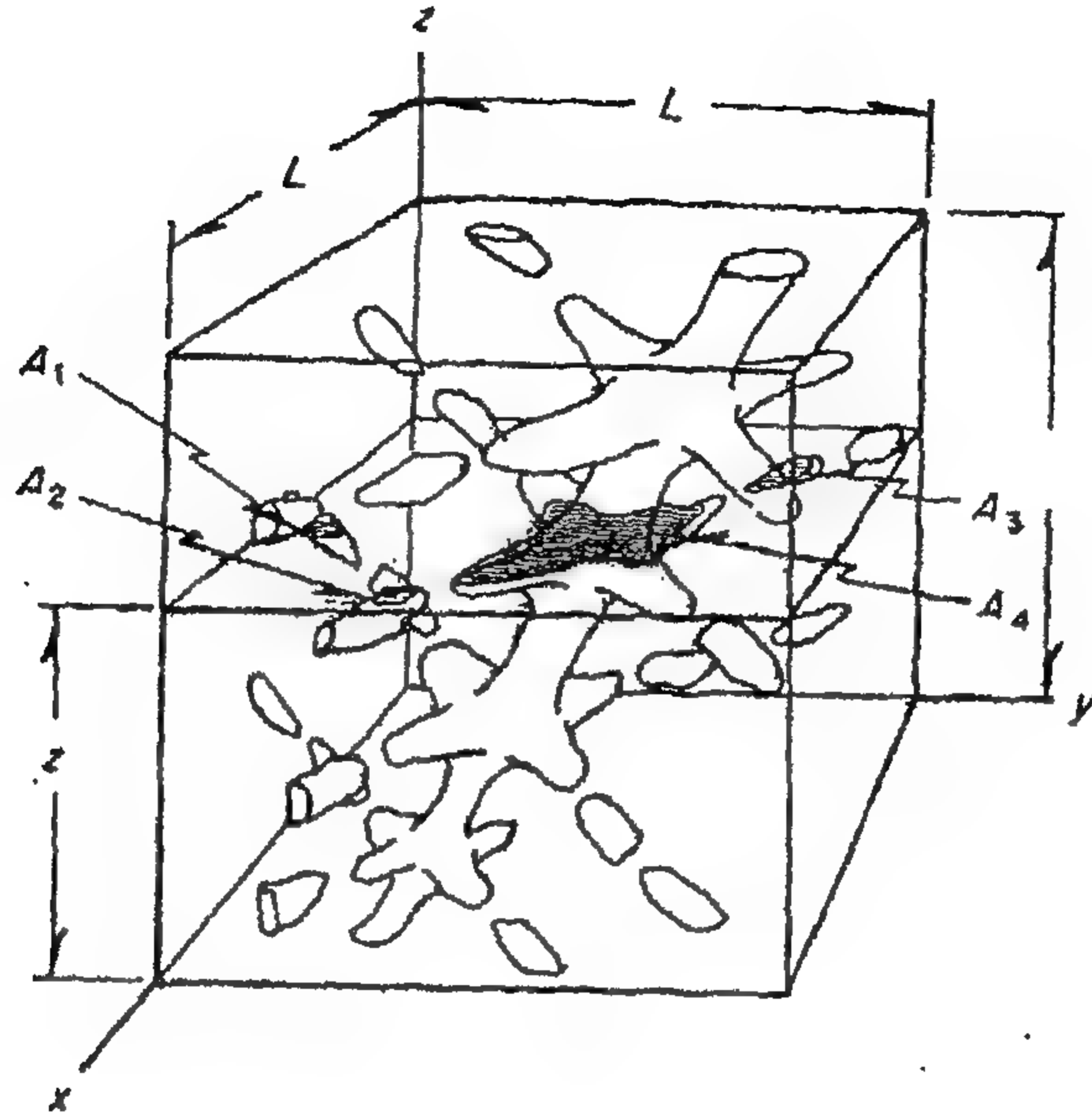
فلو فُرض انه تم اخذ نموذج على شكل مكعب طول ضلعه L ، الشكل (1-8)

فيكون الكسر الحجمي V_v هو :

$$V_v = \frac{V_{\alpha\text{-phase}}}{L^3} = \frac{V_{\alpha}}{V} \quad \text{..... (1-8)}$$

حيث أن: $V_{\alpha} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$

V : هو حجم المكعب . V_{α} : مجموع أحجام جسيمات الطور الثاني (α) المنبثقة في النموذج.



الشكل (1-8) نموذج مكعب الشكل طول ضلعه L يبين أشكال جسيمات الطور الثاني (α) المنبثقة فيه مع مستوى فحص قاطع له على مسافة Z حيث يبين مساحة مقطع كل جسيمه عند هذه المسافة. مجموع أحجام جسيمات الطور (α) في هذا المكعب هو V_α ومجموع مساحة مقطع الجسيمات عند المستوى المشار إليه (على مسافة Z) هو A_α .

٨-٤ الكسر المساحي Areal fraction : A_A

ويُعرف بأنه نسبة المساحة الكلية لمقاطع الطور الثاني (الطور الفا) الموجود ضمن المساحة المرئية من النموذج إلى مساحة المقطع المرئي من النموذج نفسه، فلو لوحظ الشكل (1-8) يكون الكسر المساحي

$$A_A = \frac{A_\alpha}{L^2} = \frac{A_\alpha}{A} \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

حيث أن :

A_α هي مجموع مساحة مقاطع الطور الفا (α) الموجود في المساحة الكلية لسطح النموذج (L^2) المرئية .

٥-٨ الكسر الخطي L_L Lineal fraction :

هو نسبة مجموع الاطوال المقطوعة من الطور الثاني (α) في مستوي ما من النموذج بواسطة خط ذو طول معلوم الى طول ذلك الخط (L) ، كما في الشكل (2-8) أي أن :

$$L_L = \frac{L_\alpha}{L} \quad \text{..... (3-8)}$$

حيث أن :

$$L_\alpha = L_1 + L_2 + L_3 + \text{.....}$$

L طول خط القياس .

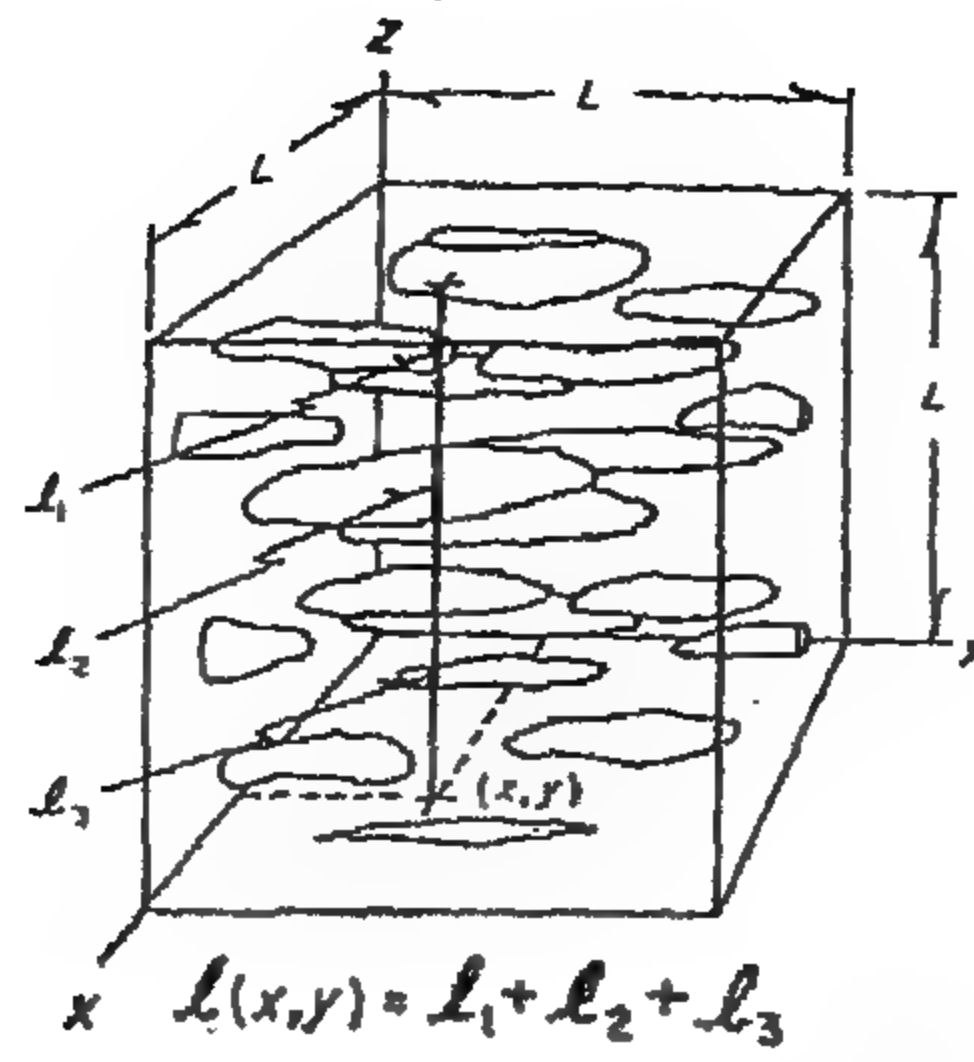
L_α مجموع اطوال تقاطعات الطور الثاني α مع الخط (L) .

٦-٨ الكسر النقطي (P_P) point fraction :

إذا تم وضع نقطه بصورة عشوائية خلال حجم النموذج الذي يتضمن جسيمات من الطور الثاني (α) ، فالاحتمالية التي بها تقع تلك النقطة على الطور الثاني تمثل الكسر النقطي والذي يساوي الكسر الحجمي للطور الثاني أيضاً . وبنفس الطريقة اذا وضعت نقاط على مقطع مستوي من النموذج بصورة عشوائية فالاحتمالية في ان تقع هذه النقاط على الطور الثاني يمثل الكسر المساحي وبنفس الطريقة اذا كانت النقاط موزعة على خط ما فالاحتمالية تساوي الكسر الخطي . هذه الاحتمالية تمثل الكسر النقطي اي أن :

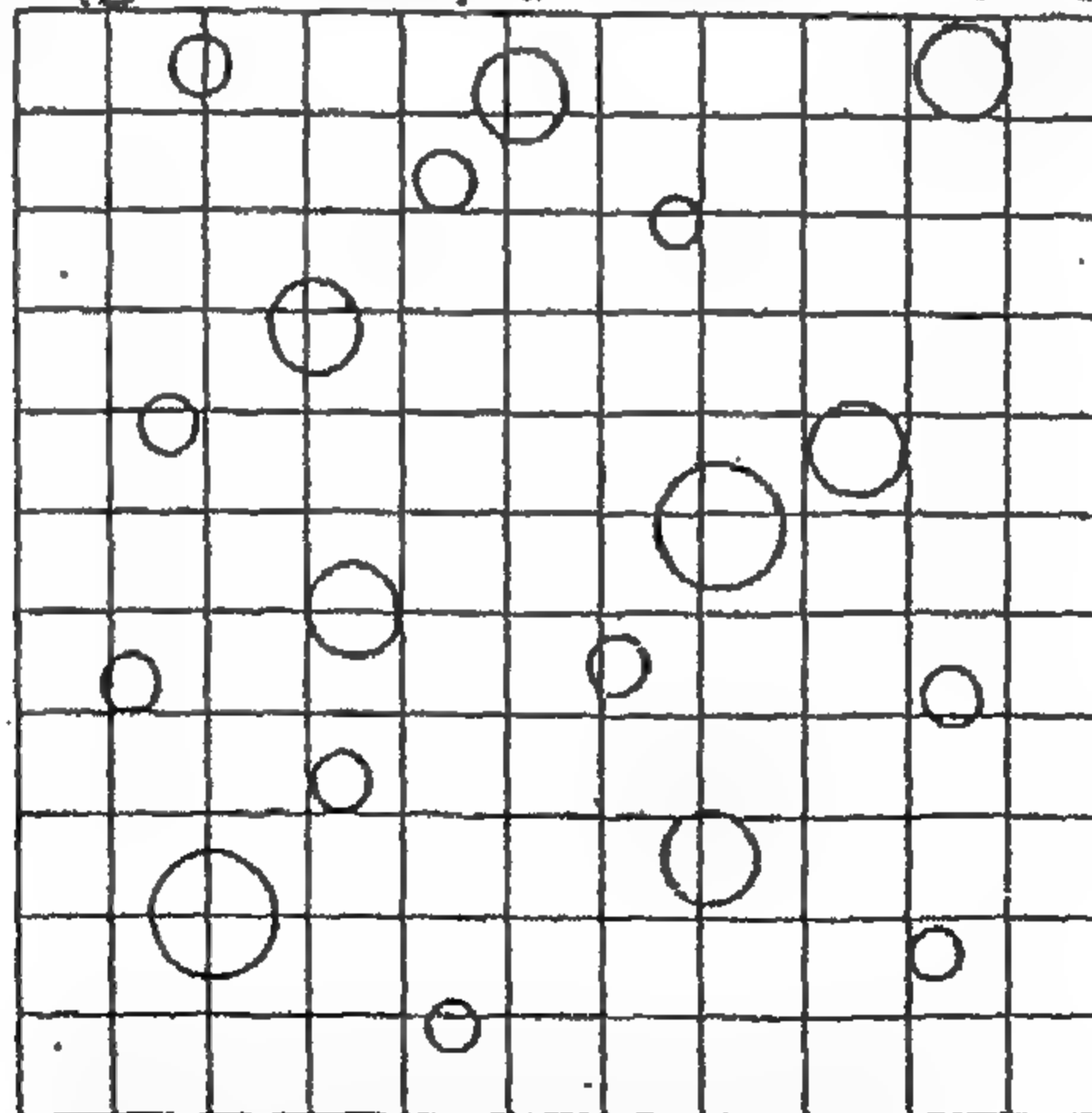
$$P_P = V_V = A_A = L_L \quad \text{..... (4-8)}$$

وقد تم اثبات العلاقة الاخيرة (4-8) رياضياً في الكتب المتخصصة في الميتالوجرافيا الكمية والمذكور قسم منها في نهاية الكتاب .



الشكل (2-8) يبين نموذج مكعب مع بنيته بثلاثة أبعاد إضافة الى خط فحص طوله (L) اي بقدر طول ضلع المكعب. ان مجموع اطوال خط الفحص المار بالطور الثاني (α) يتغير مع قيمة الاحداثيين X و Y عند تقاطع خط الفحص (موازي الى Z) مع مستوييهما. ان مجموع اطوال خط الفحص الفاطح للطور الثاني هو ($L\alpha$) او $L(x,y)$.

مثال: يمثل الشكل (3-8) رسماً تخطيطياً لجزء من سطح عينه فيها الطور الثاني على هيئة دوائر منتظمة إلا أنها غير متجانسة من حيث المساحة او التوزيع، وقد وضع عليه شبكة منتظمة الخطوط والنقاط (تقاطعات الخطوط الطولية والعرضية). جد الكسر الحجمي بوساطة التحليل المساحي والخطي والنقطي إذا علمت ان مساحة الجزء الكلية $A_T = 12100 \text{ mm}^2$ ومقدار الطول الكلي للخطوط الطولية والعرضية $L_T = 2200 \text{ mm}$ وعدد النقاط الكلية (نقاط التقاطع) $P_T = 100$.



$$\begin{aligned} A_T &= 12,100 \text{ mm}^2 \\ L_T &= 2200 \text{ mm} \\ P_T &= 100 \end{aligned}$$

الشكل (3-8) رسم تخطيطي لجزء من سطح عينه يشاهد فيه الطور الثاني (α) على هيئة دوائر منتظمة.

١- التحليل المساحي:

$$V_{V\alpha} = \frac{\Sigma A_{\alpha}}{A_T} = \frac{\text{مجموع مساحة الدوائر}}{\text{المساحة داخل الاطار}}$$

$$= \frac{894.75}{12100} = 0.073$$

التحليل الخطي :

$$L_{L\alpha} = \frac{\Sigma L_{\alpha}}{L_T} = \frac{\text{مجموع اطوال الخطوط التي تقطع الدوائر}}{\text{طول الخطوط الكلي}}$$

$$= \frac{1523}{2200} = 0.069$$

التحليل النقطي:

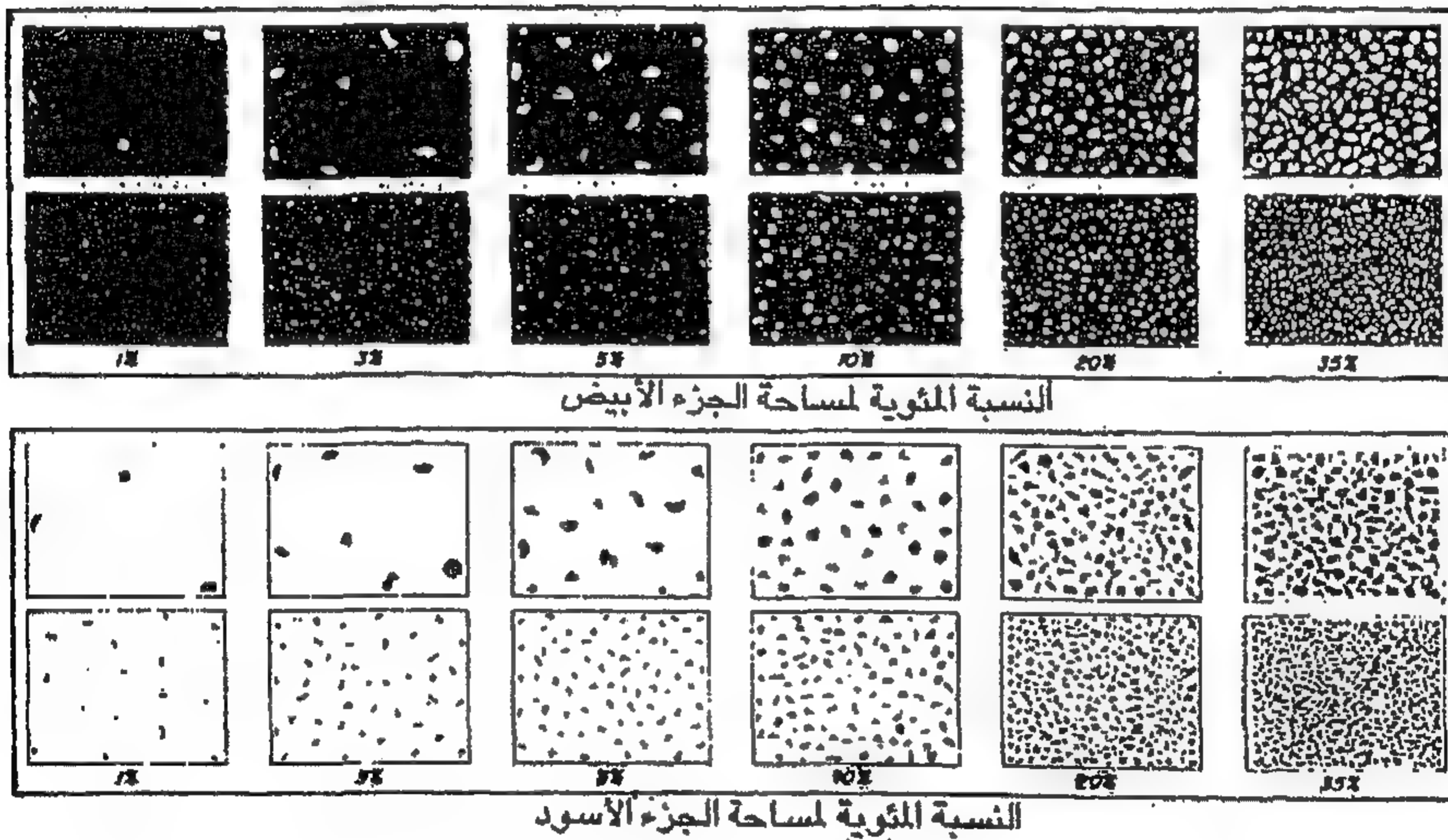
$$P_{P\alpha} = \frac{\Sigma P_{\alpha}}{P_T} = \frac{\text{عدد النقاط الواقعة على الدوائر + نصف عدد النقاط المماسه}}{\text{عدد النقاط الكلي}}$$

$$= \frac{5 + 2 \times \frac{1}{2}}{100} = 0.06$$

ومن هنا يتبين ان الكسر المساحي لايساوي الكسر الخطي او الكسر النقطي إلا ان هذه المقادير تقترب من بعضها إذا أخذت قراءات كثيره (أي عدة مجالات) ولقاطع عديده من النموذج وفي هذه الحالة يقل الخطأ وتكون النتائج اقرب الى الواقع ايضاً.

يمكن تنفيذ حساب الكسر النقطي (Pp) بعدة أساليب (اضافة الى التحليل المساحي والتحليل الخطي) وهي:

- ١- استخدام سلسلة نقاط واقعة على خط واحد وموزعة عشوائياً.
- ٢- استخدام سلسلة نقاط واقعة على خط واحد وموزعه بشكل منتظم.
- ٣- استخدام عدد من النقاط واقعة ضمن مساحة (ذات بعدين) وموزعة بصورة عشوائية.
- ٤- استخدام عدد من النقاط واقعة ضمن مساحة (ذات بعدين) وموزعة بصورة منتظمة . يبين الشكل (4-8) لوحات قياسية لتخمين الكسر الحجمي بطريقة المقارنة.



الشكل (4-8) لوحة لتخمين الكسر الحجمي وقد طوّرت من قبل الباحث
نيلسون (Nelson).

٧-٨ قياس الحجم الحبيبي (البلوري) Grain size Measurements

هناك العديد من القياسات يمكن استخدامها للتعبير عن الحجم الحبيبي وحسب تعريفه وهي:

– معدل القطر.

– معدل المساحة.

– عدد الحبيبات (البلورات) في وحدة المساحة.

– عدد الحبيبات (البلورات) في وحدة الحجم.

– معدل القطر اعتماداً على معدل حجم الحبيبة.

وبناءً على ذلك يمكن استخدام عدة طرائق لقياس الحجم الحبيبي:

١- طريقة المقارنة مع حجوم قياسية (وهي الطريقة المنسوبة الى الجمعية الامريكية للفحص والمواد القياسية (ASTM).

٢- الطريقة المساحية (طريقة جفريز (Jeffries).

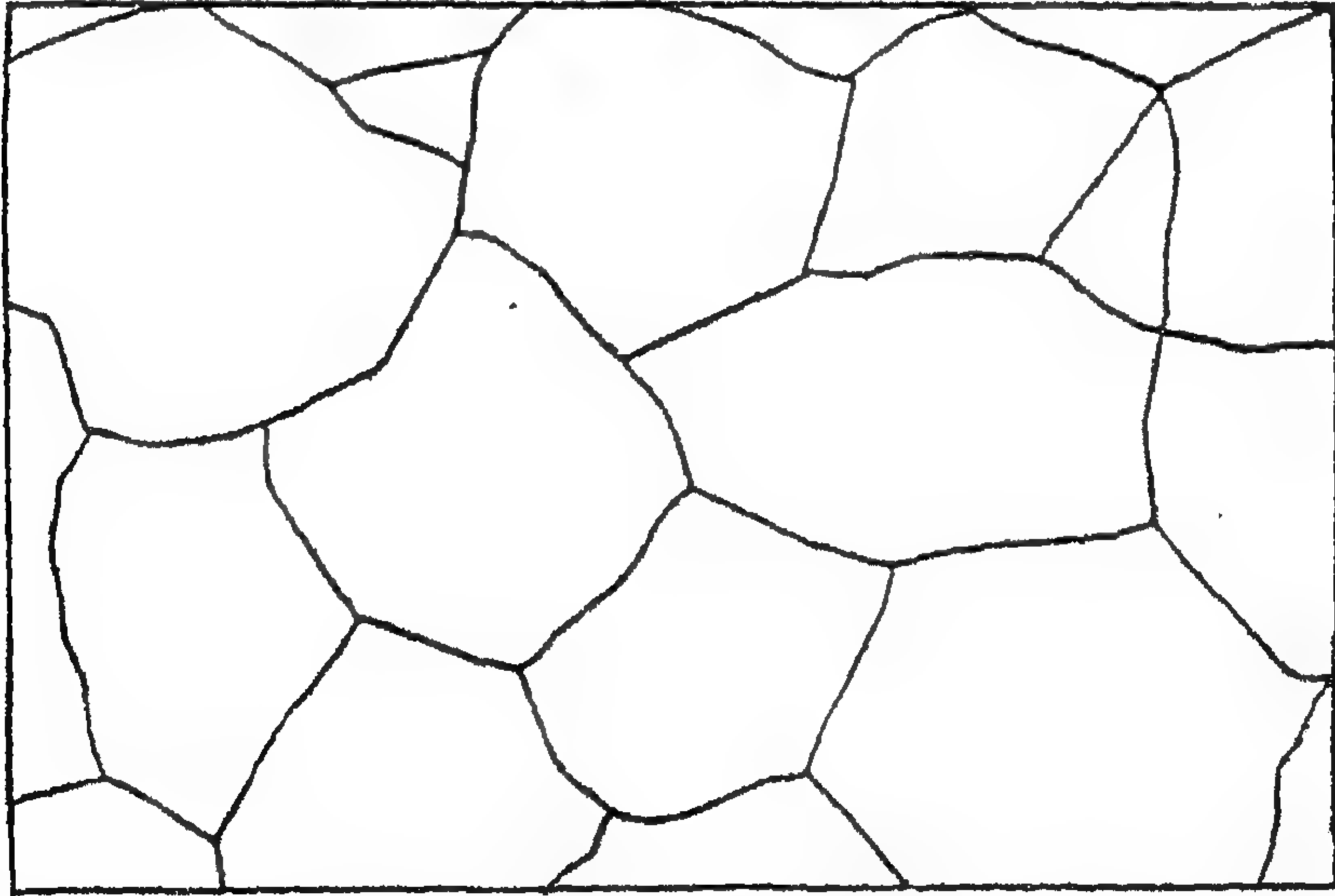
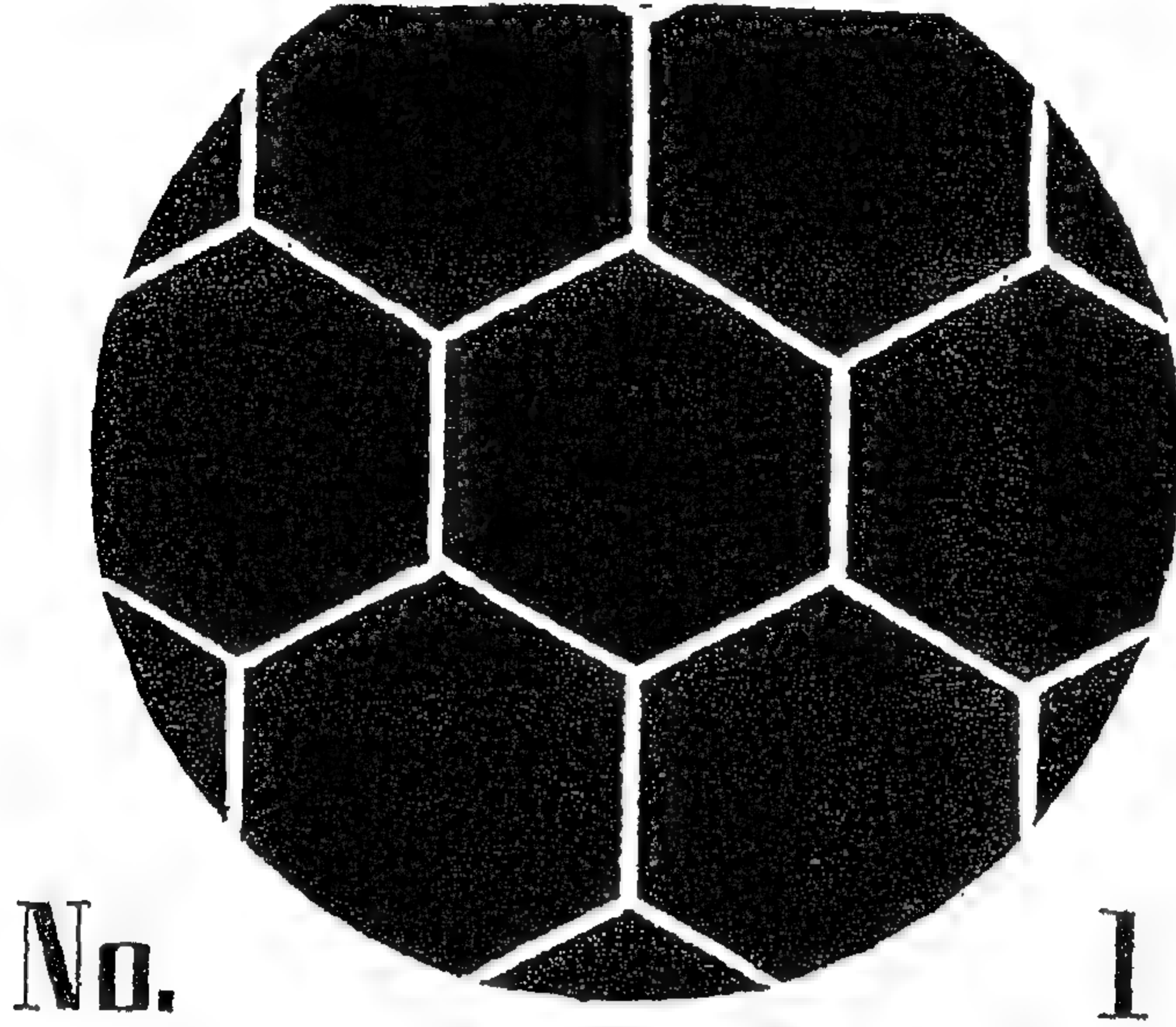
٣- طريقة التقاطع الخطي (طريقة هاين (Heyn).

وهناك طرائق أخرى اقل شهرة من الطرائق آنفة الذكر إلا أنه سيتم التطرق الى الطرائق الثلاث المذكورة فقط.

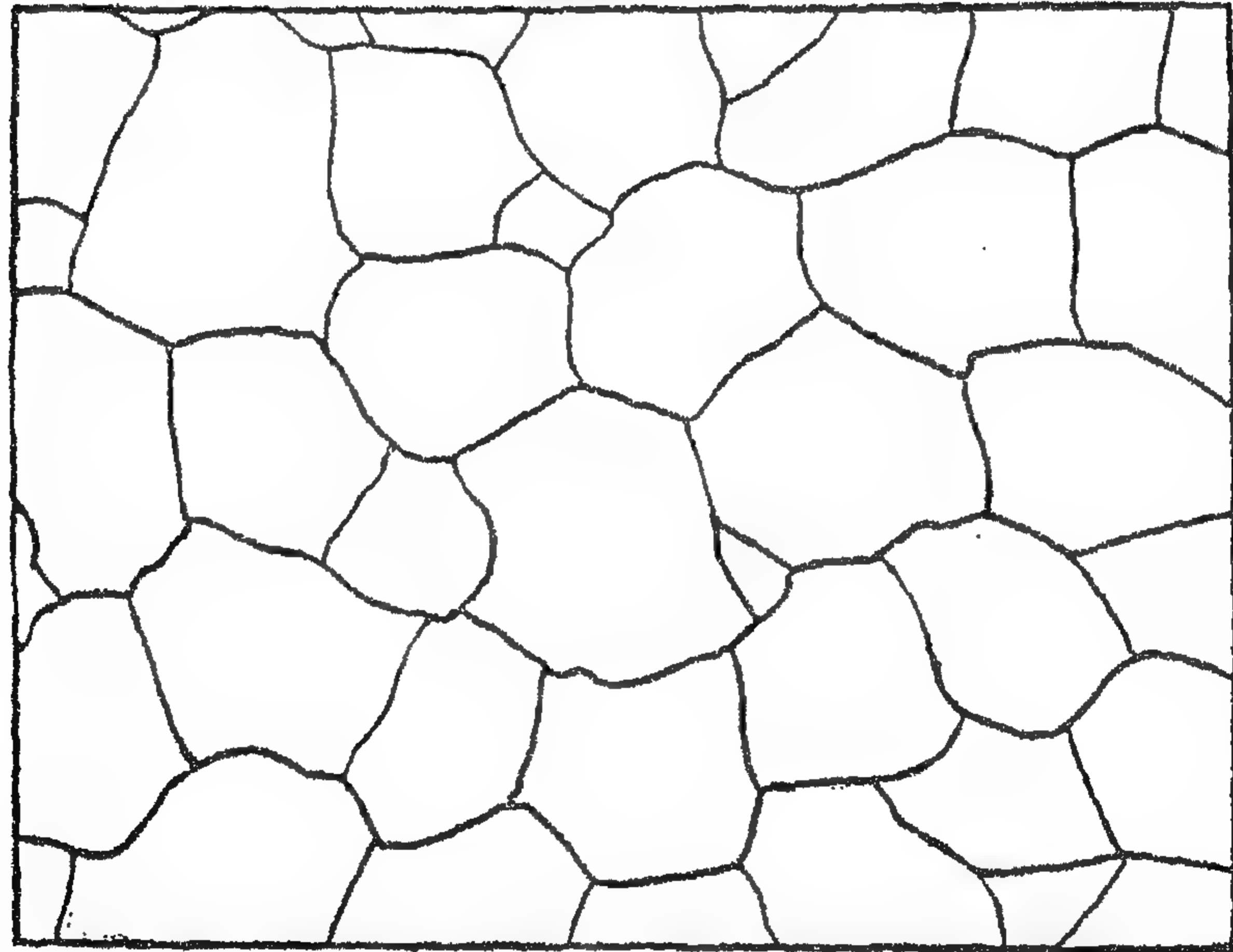
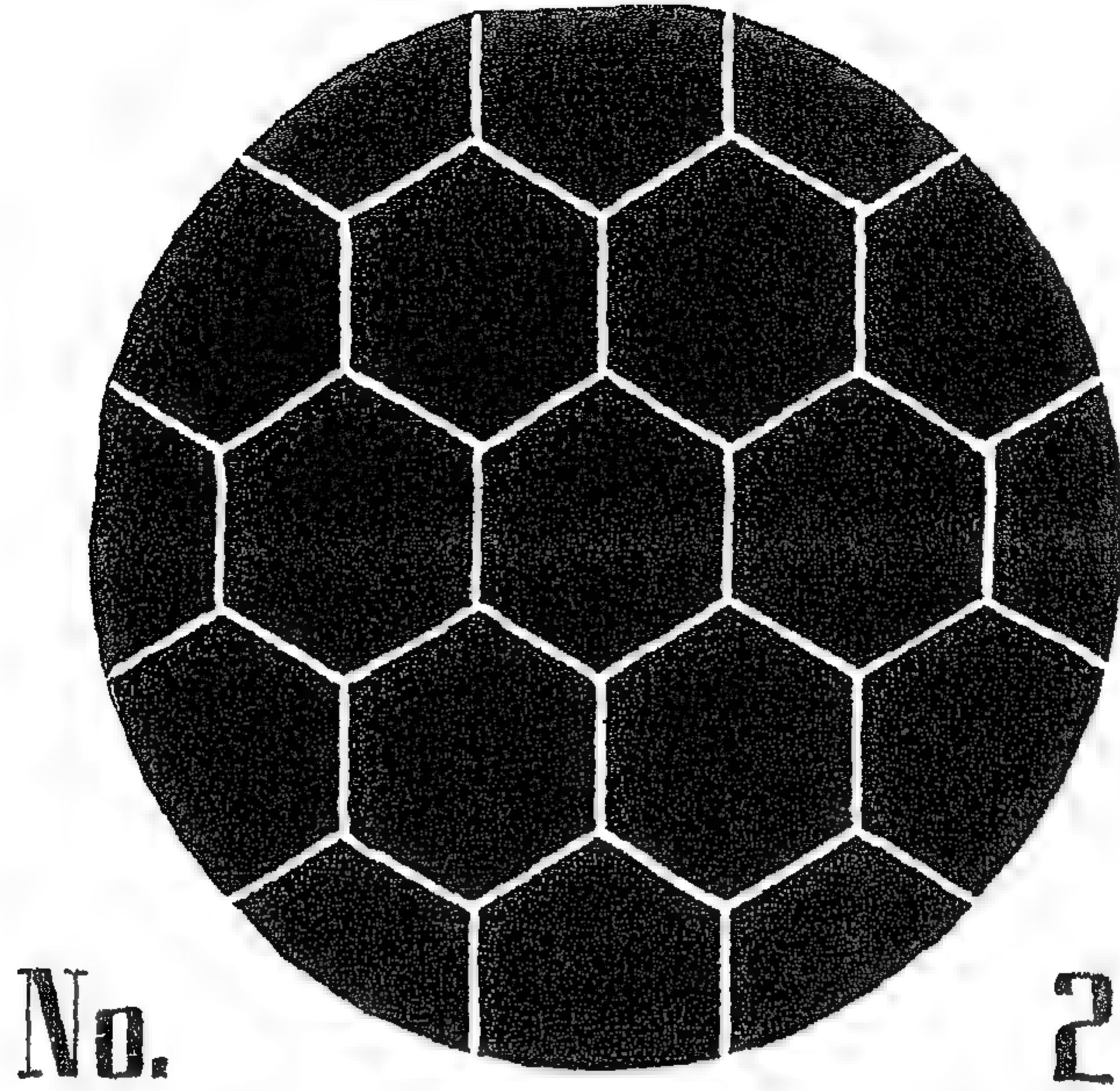
١- طريقة ASTM :

يمكن تحقيق هذه الطريقة اما بالمقارنة فقط مع شبكات قياسية ذات عيون مختلفة القياس لتتلائم مع البنية الدقيقة وتكون هذه الشبكات ذات عيون سداسية منتظمة او غير منتظمة العيون. حيث يمثل الشكل (5-8) (h,g,f,e,d,c,b,a) ثمانية نماذج منها وهي الشبكات التي تقع حجوم حبيبات المعادن والسبائك ضمنها عادة.

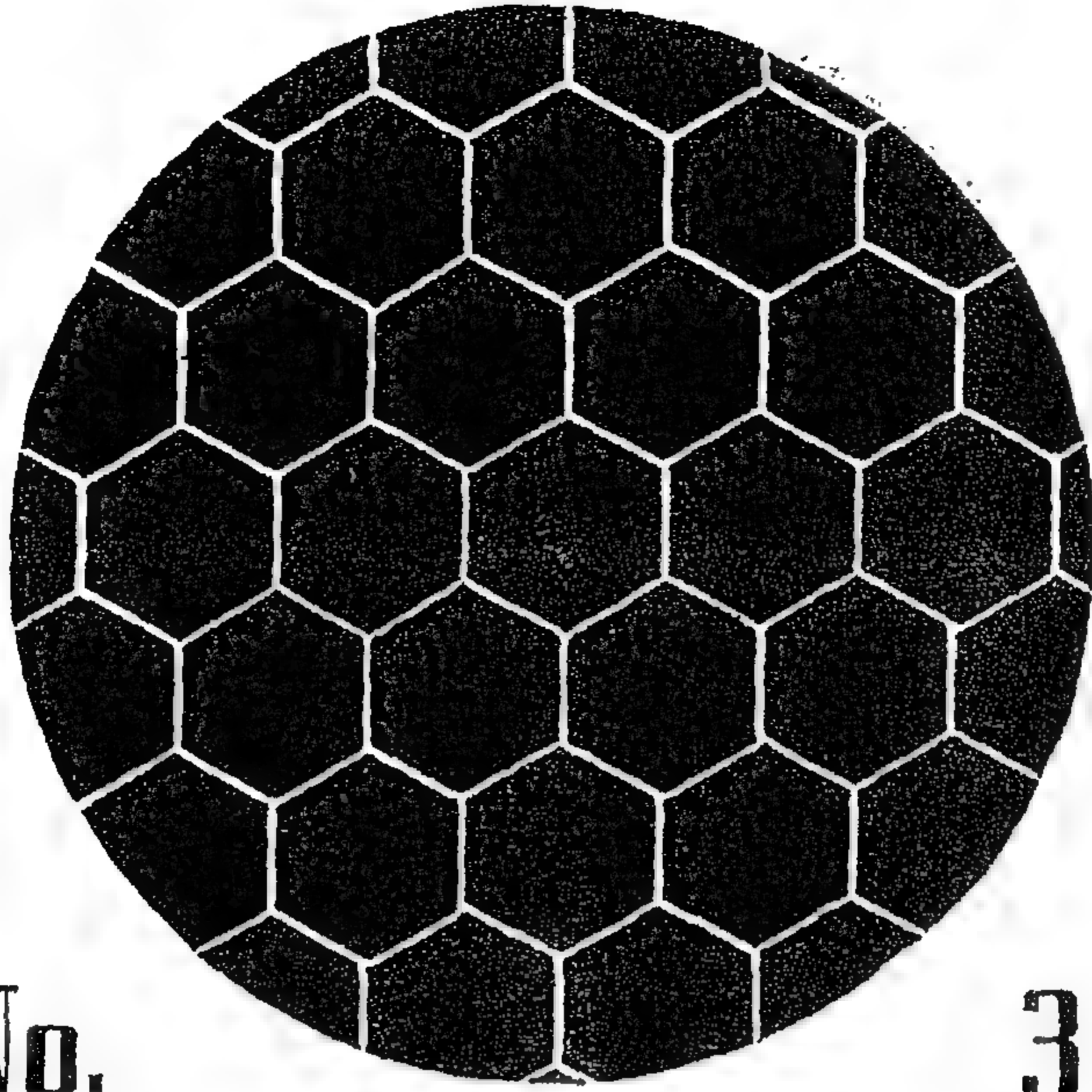
الشكل (5-8) شبكات الحجم البلوري ASTM القياسية لأحجام مختلفة
(h,g,f,e,d,c,b,a) للسبائك الحديدية.



(a) يمثل النموذج الاعلى شبكه سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (1) في تدرج ASTM
ويمثل حبيبه واحدة بالانج المربع الواحد. أما الشكل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (1) في تدرج
ASTM وعدد الحبيبات في الانج المربع يصل الى $1 \frac{1}{2}$ عند تكبير مئة ضعف (100X)

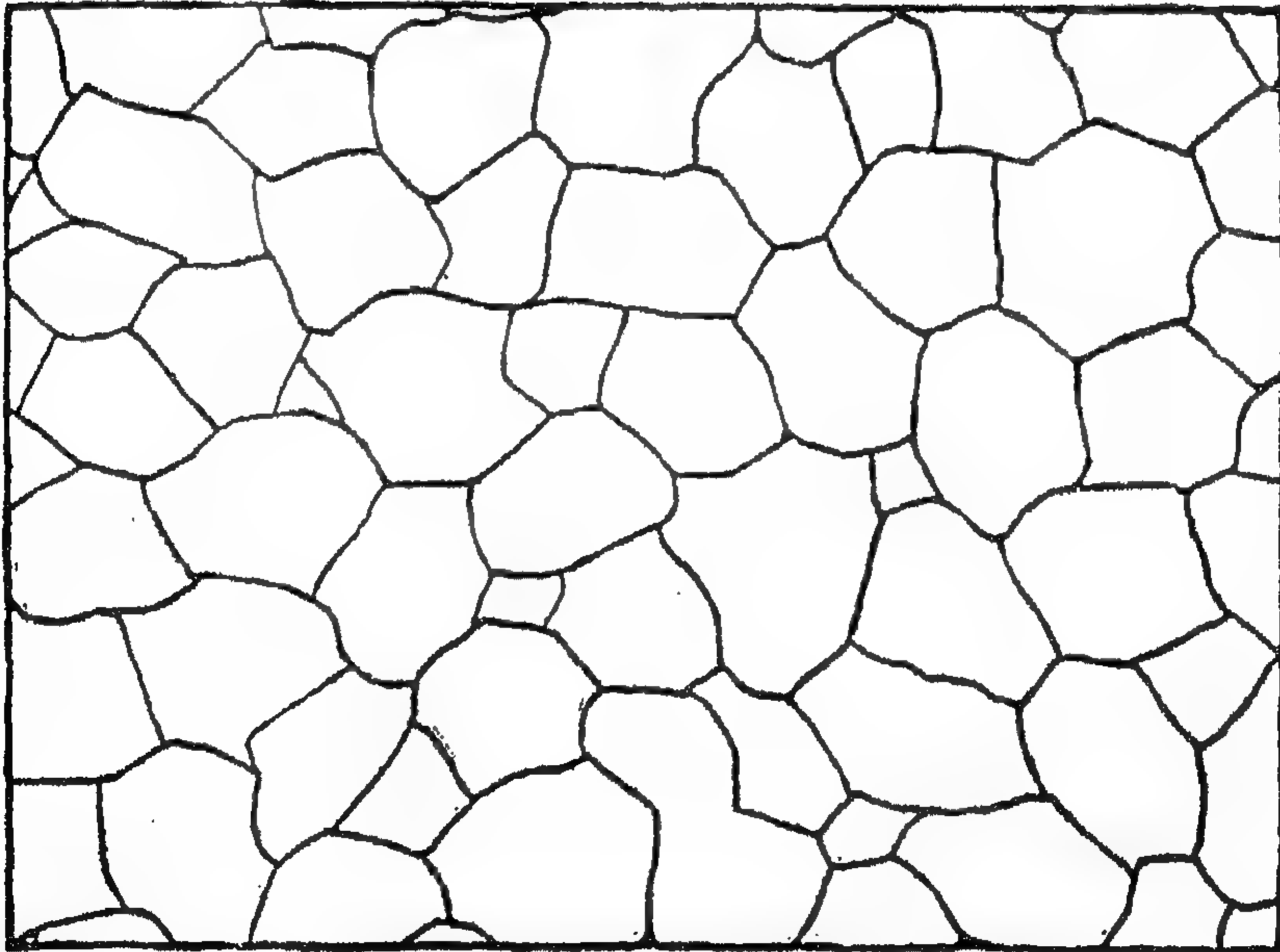


(b) يمثل النموذج الاعلى شبكة سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (2) في تدرج ASTM ويمثل حبيبتين بالانج المربع الواحد، اما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (2) في تدرج ASTM وعدد الحبيبات في الانج المربع يتراوح بين 1 الى 3 عند التكبير (100X)

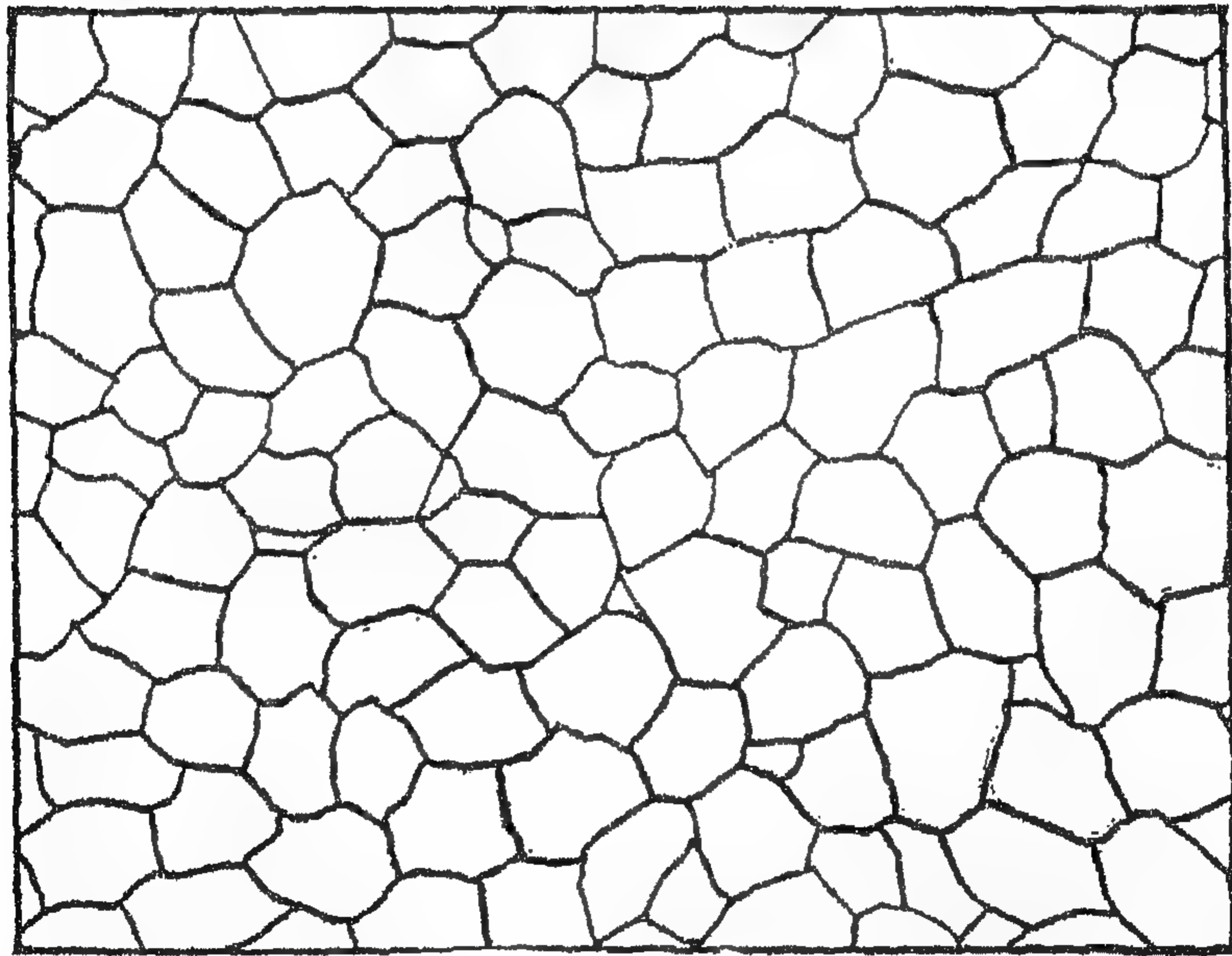
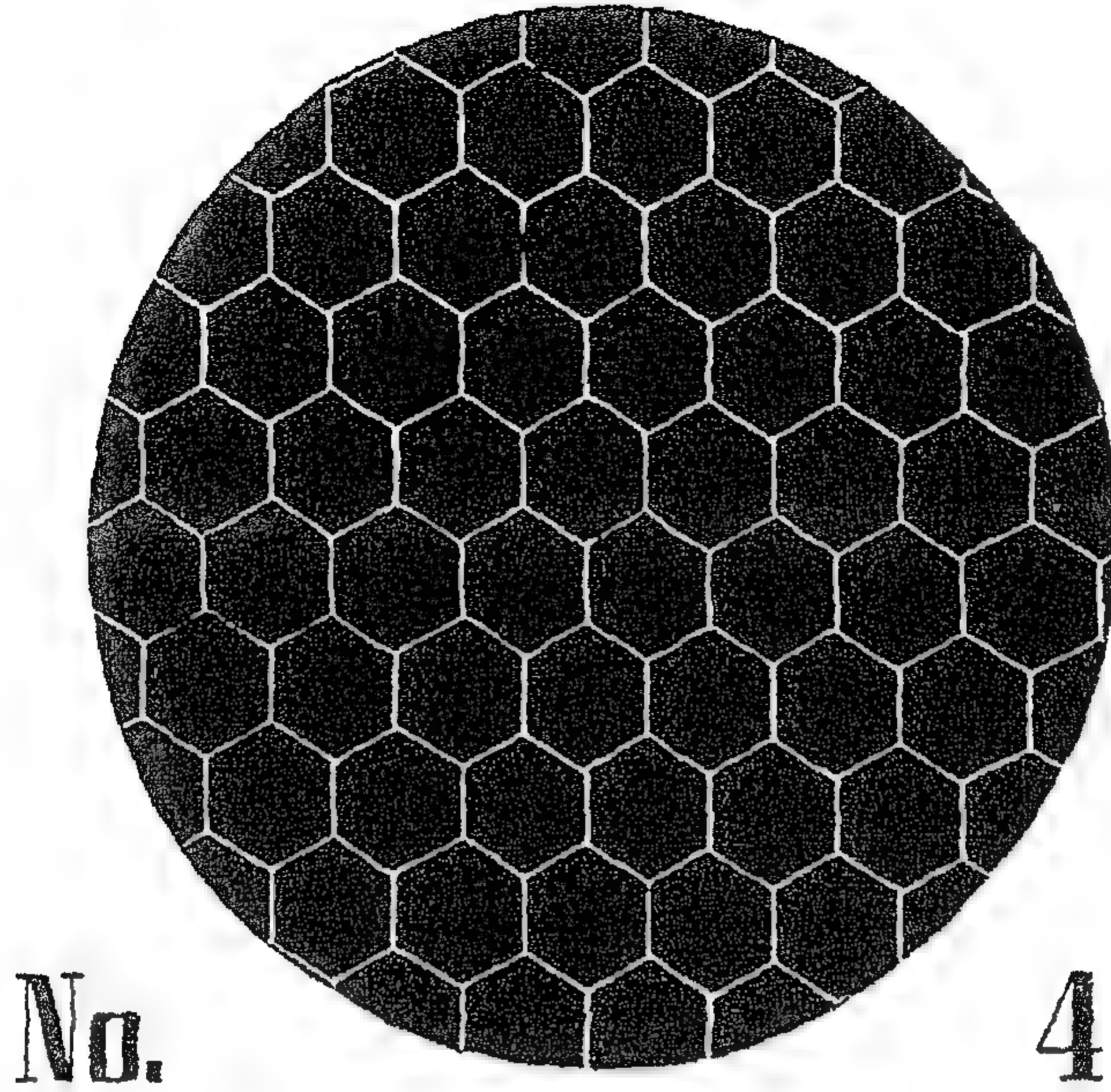


No.

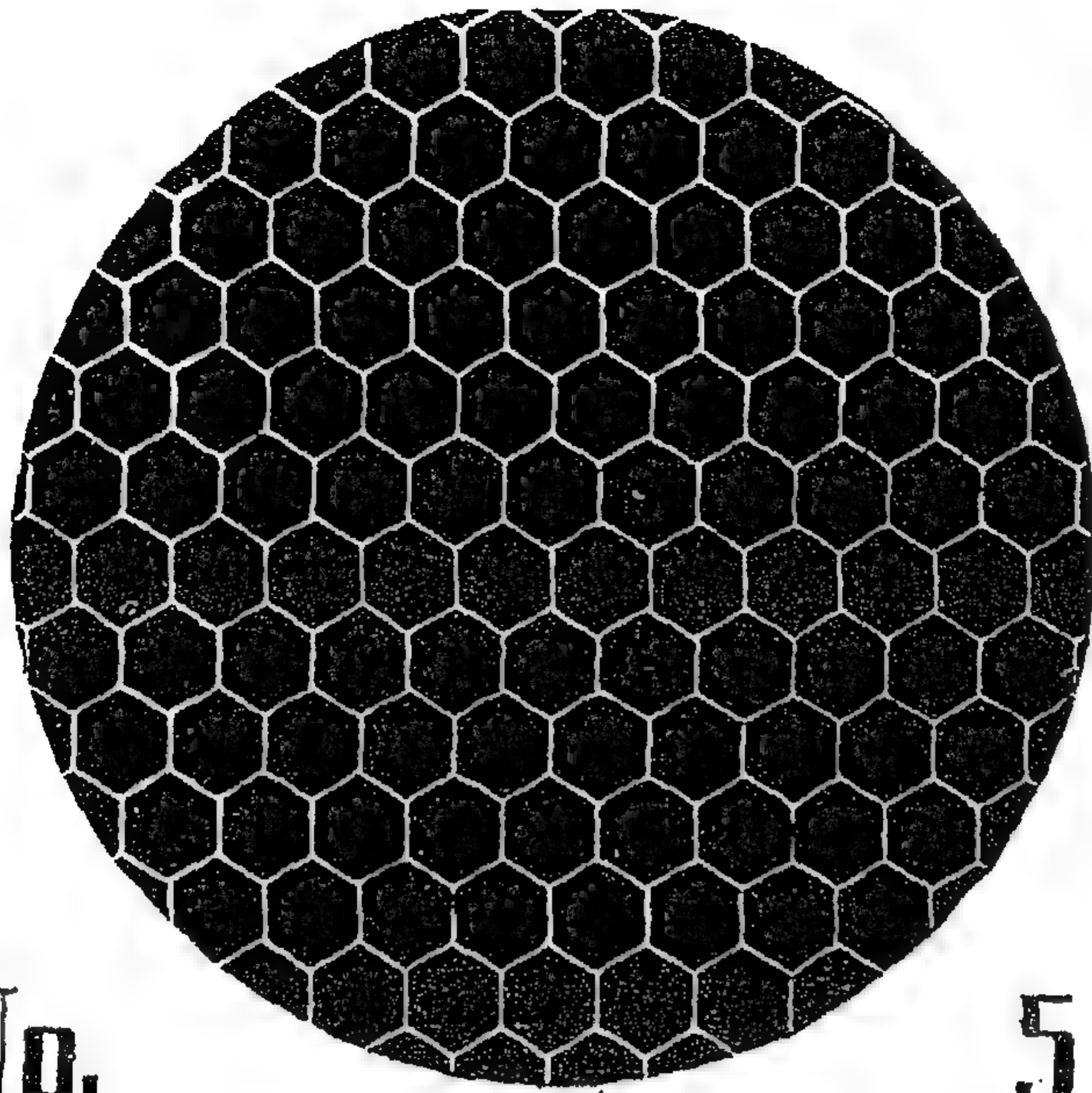
3



(C) يمثل النموذج الاعلى شبكة سداسية مثاليه لمعدل حجم حبيبي رقم (3) في تدرج ASTM ويمثل اربع حبيبات بالانج المربع الواحد. اما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (3) في تدرج ASTM ويتراوح عدد الحبيبات في الانج المربع يتراوح بين 3 الى 6 عند التكبير (100X)

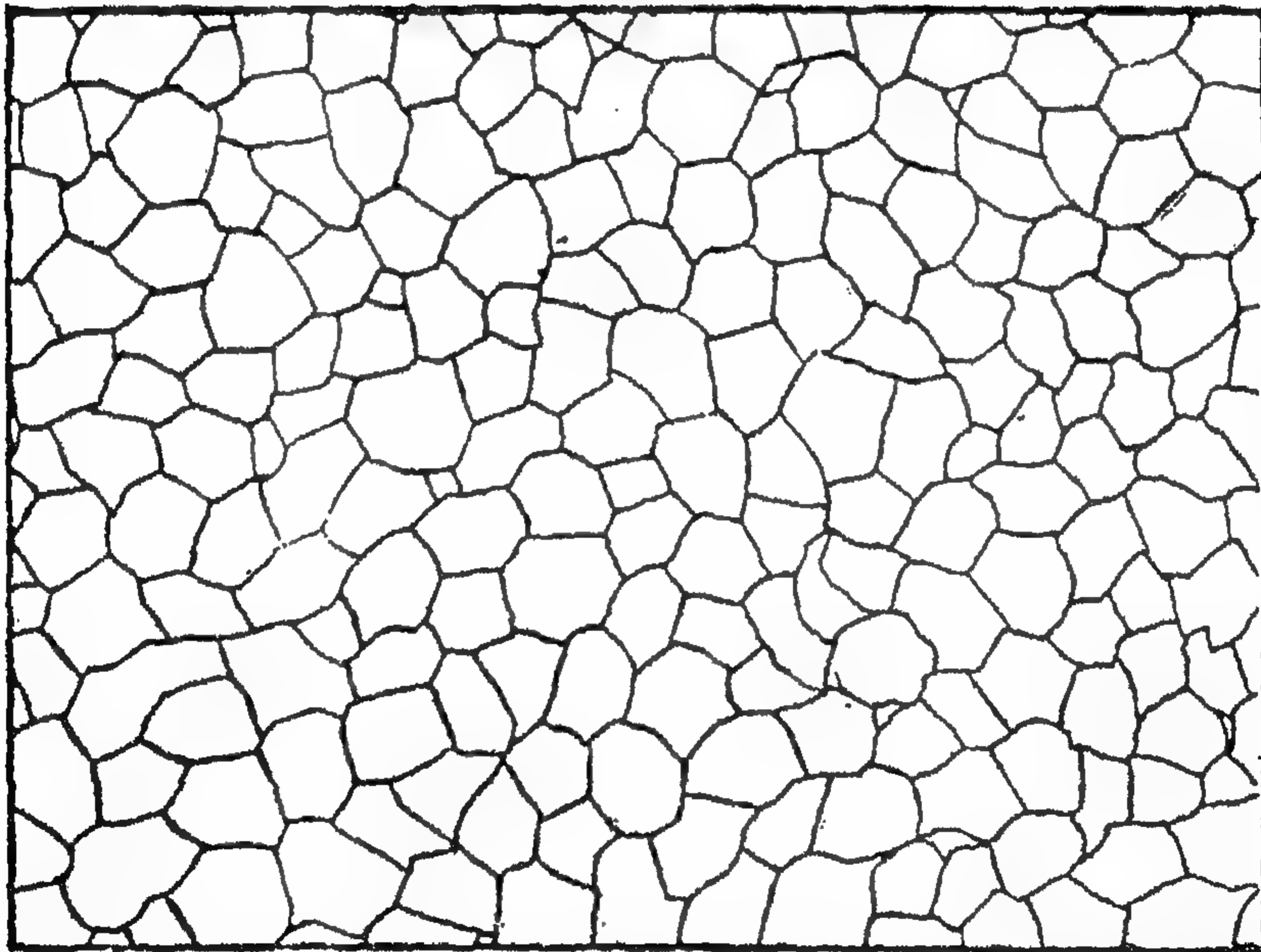


(d) يمثل النموذج الأعلى شبكة سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (4) في تدرج ASTM ويمثل ثمان حبيبات بالانج المربع الواحد. أما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (4) في تدرج ASTM وعدد الحبيبات يتراوح بين (6) الى (12) عند التكبير (100X)

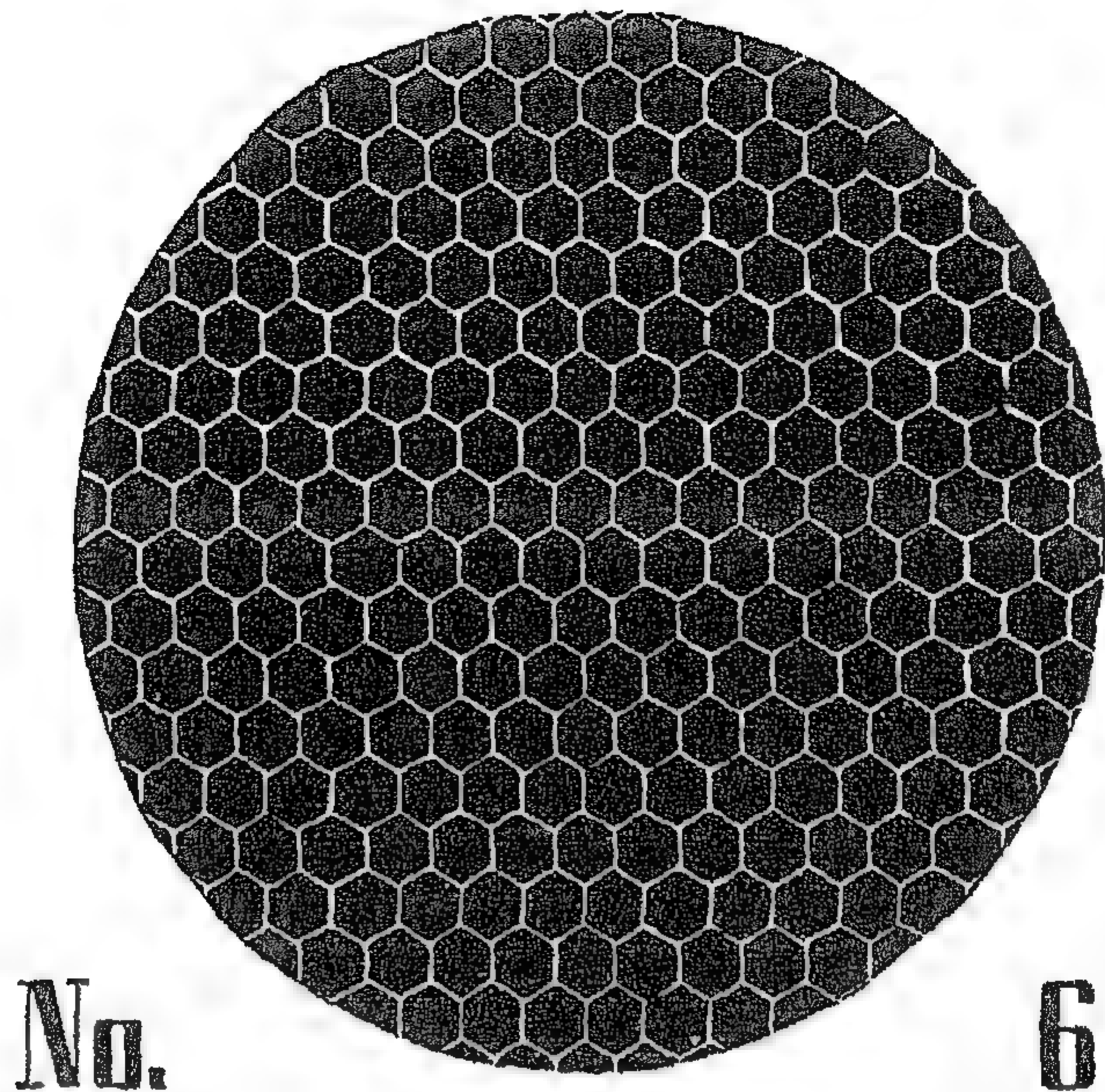


No.

5

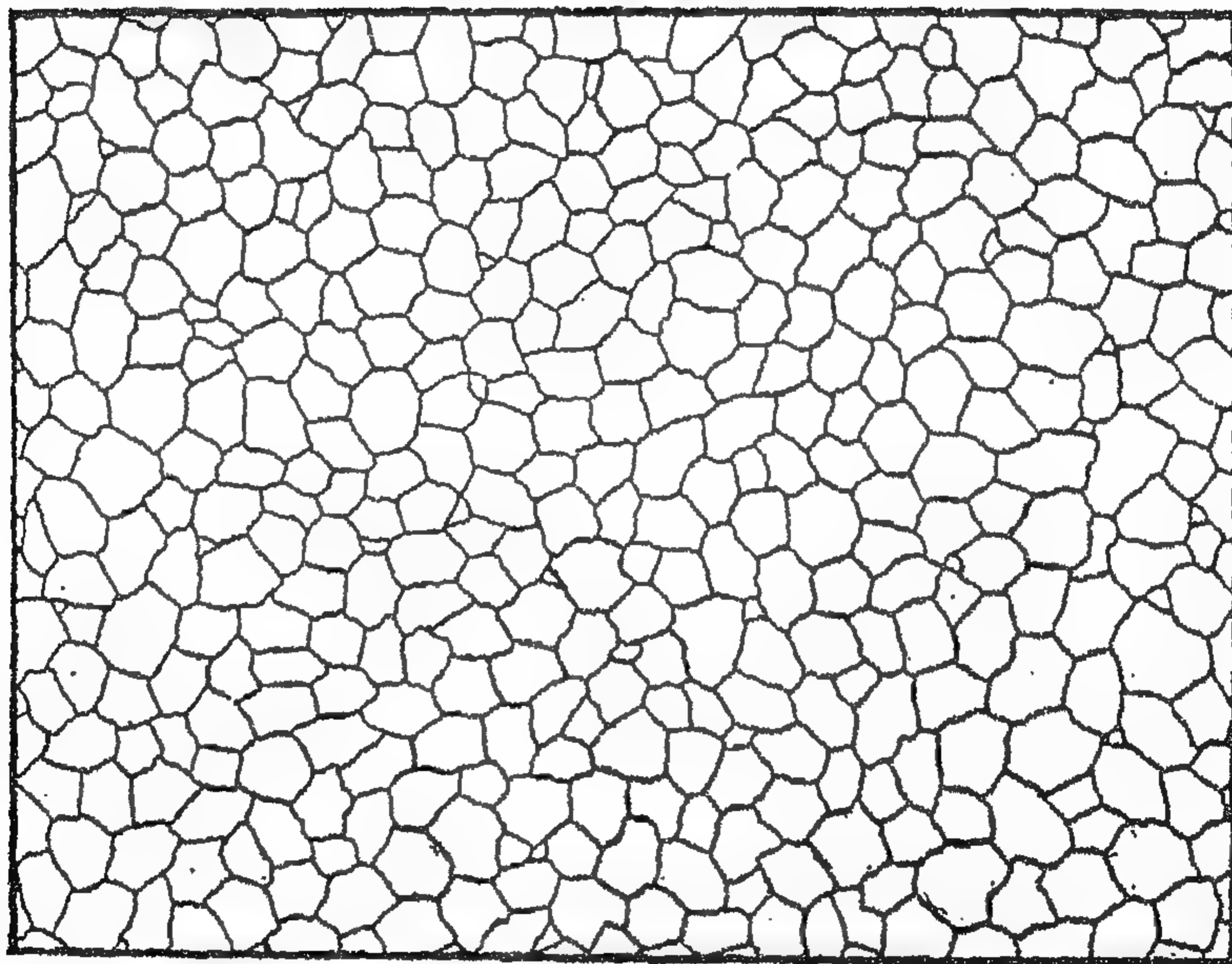


(e) يمثل النموذج الاعلى شبكة سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (5) في تدرج ASTM ويمثل 16 حبيبه بالانج المربع الواحد. اما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (5) في تدرج ASTM وعدد الحبيبات في الانج المربع يتراوح بين 12 الى 24 عند التكبير (100X)

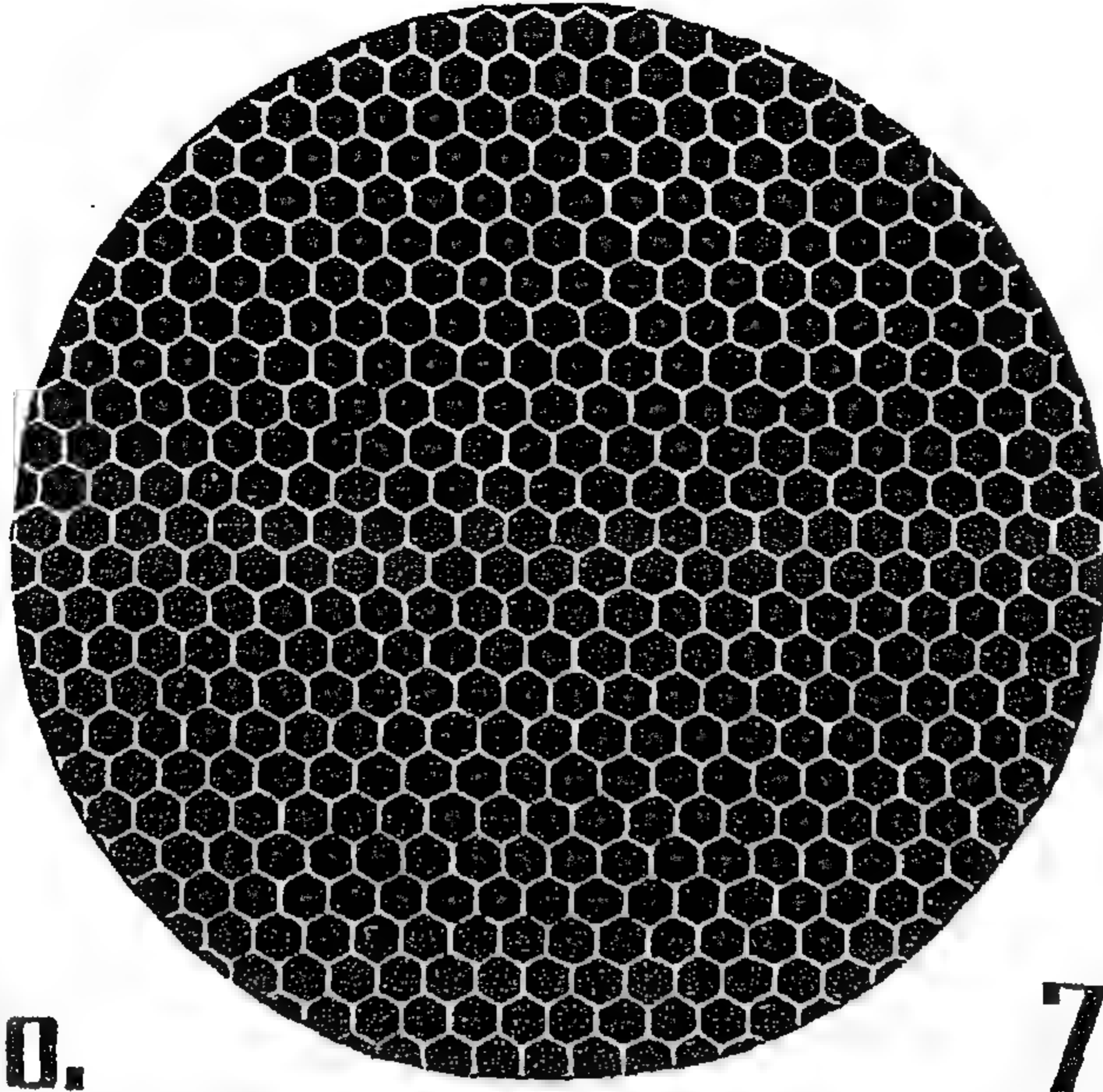


No.

6

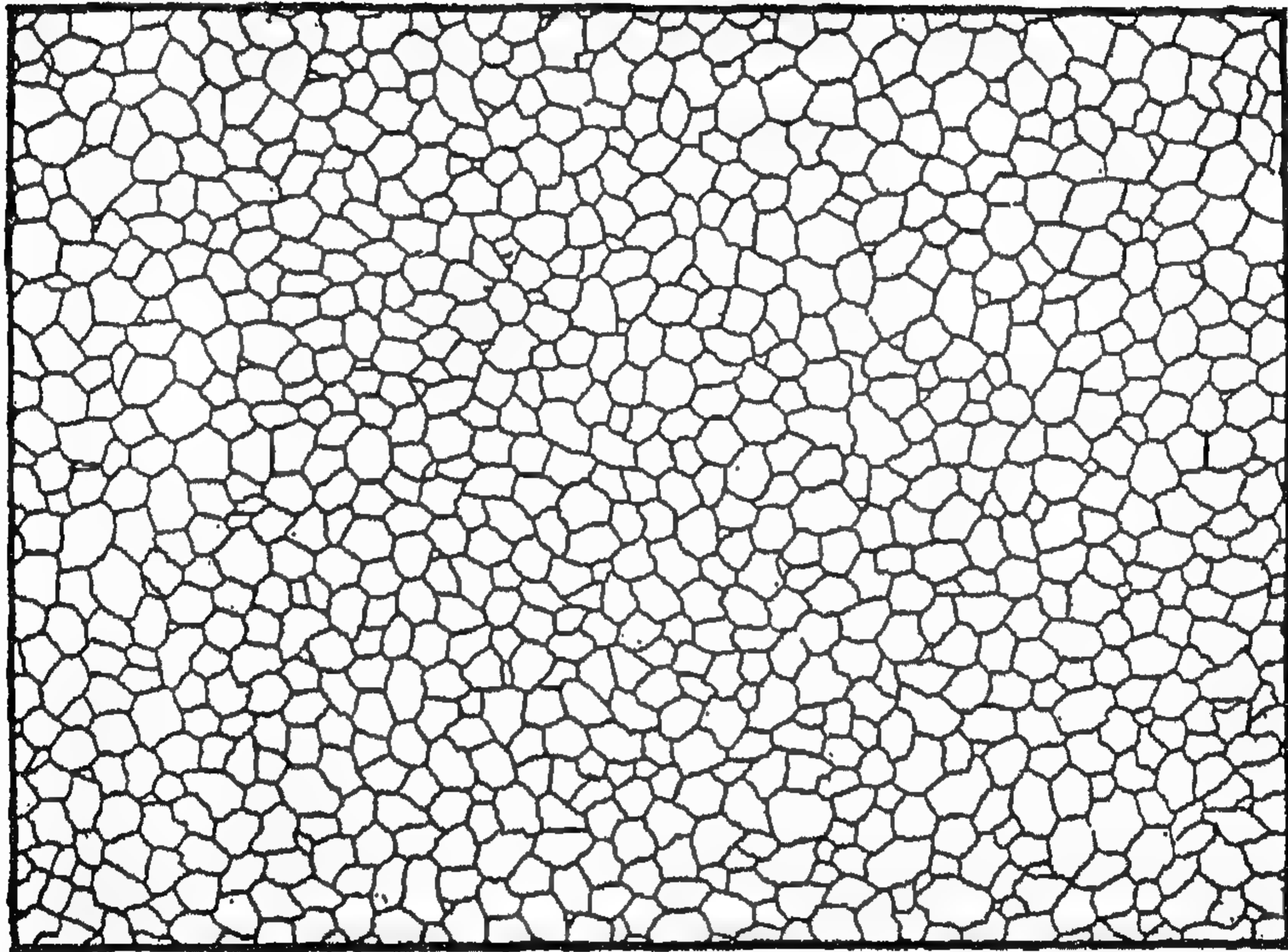


(f) يمثل النموذج الاعلى شبكة سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (6) في تدرج ASTM ويمثل 32 حبيبة بالانج المربع الواحد. اما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (6) في تدرج ASTM وعدد الحبيبات في الانج المربع يتراوح بين 24 الى 48 عند التكبير (100X)

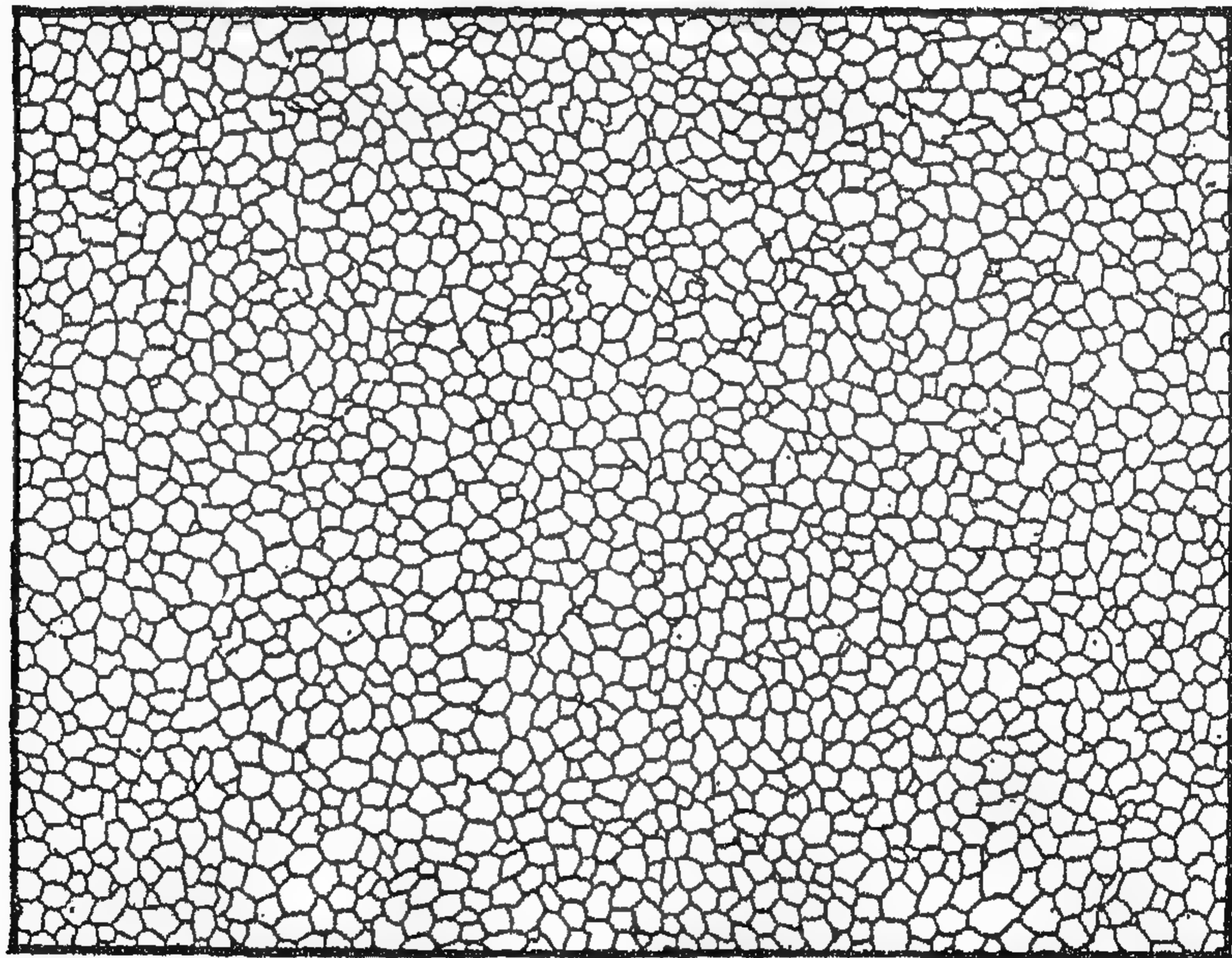
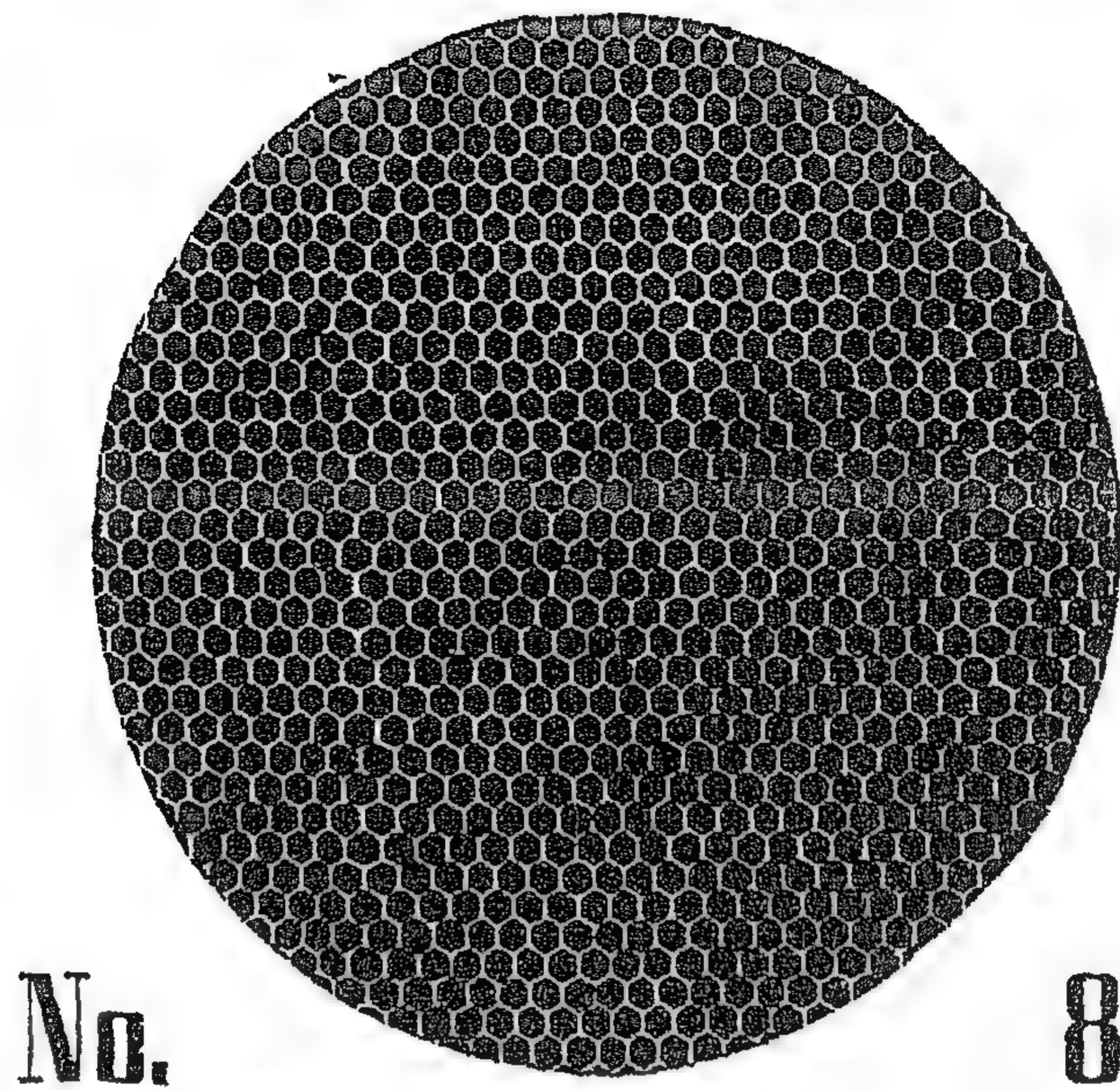


No.

7



(g) يمثل النموذج الاعلى شبكة سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (7) في تدرج ASTM ويمثل 64 حبيبة بالانج المربع الواحد. اما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (7) في تدرج ASTM وعدد الحبيبات في الانج المربع يتراوح بين 48 الى 96 عند التكبير (100X)



(h) يمثل النموذج الاعلى شبكة سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (8) في تدرج ASTM ويمثل 128 حبيبة بالانج المربع الواحد. اما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (8) في تدرج ASTM وعدد الحبيبات في الانج المربع يتراوح بين 96 الى 192 عند التكبير (100X)

أما مجموع عدد هذه الشبكات فهو 14 (الجدول 8-1) بموجب المواصفة ASTM E112 كل منها يمثل حجم من الحجوم الحبيبية . ولقياس الحجم الحبيبي يتم اختيار الشبكة الأكثر تطابقاً مع بنية النموذج المطلوب قياس حجمه الحبيبي بتغيير هذه الشبكات (المرسومة على أوراق شفافة عادة) حتى يتطابق مقاس فتحاتها (عيونها) مع المقاس أو الحجم الحبيبي للنموذج المفحوص بعدما يتم تحضيره باتباع الأسلوب القياسي للتحضير ومن ثم يتم استخراج رقم تدرج الحجم الحبيبي من رقم الشبكة لأن كل شبكة تمثل حجم حبيبي معين.

وكالاتي:

$$n = 2^{g-1} \quad \dots\dots\dots (5-8)$$

حيث تمثل n معدل عدد الحبيبات (البلورات) بالإنج المربع الواحد عند التكبير مئة ضعف.

g هو رقم دليل الحجم الحبيبي (grain size index unumber) في شبكة قياس ASTM وهو الرقم المثبت على كل شبكة من الشبكات الثمانية أي أنه من الرقم 1 حتى الرقم 8 .

وعليه إذا كان $g = 3$ ، على سبيل المثال، فإن عدد الحبيبات في الانج المربع (n) سيكون.

$$n = 2^{3-1} = 4$$

ويمكن كتابة العلاقة اعلاه بموجب المواصفة ASTM E91 كالاتي:

$$N_A = 15.5 \times 2^{g-1} \quad \dots\dots\dots (6-8)$$

حيث تمثل N_A عدد الحبيبات في المليمتر المربع الواحد لسطح النموذج و g رقم دليل الحجم الحبيبي في الشبكة القياسية ASTM عند تكبير مقداره مئة ضعف ايضاً. وعند كون N_A هي المعلومة يمكن استخدام العلاقة (6-8) لحساب (g) وكالاتي:.

$$g = -2.954 + 3.322 \log N_A$$

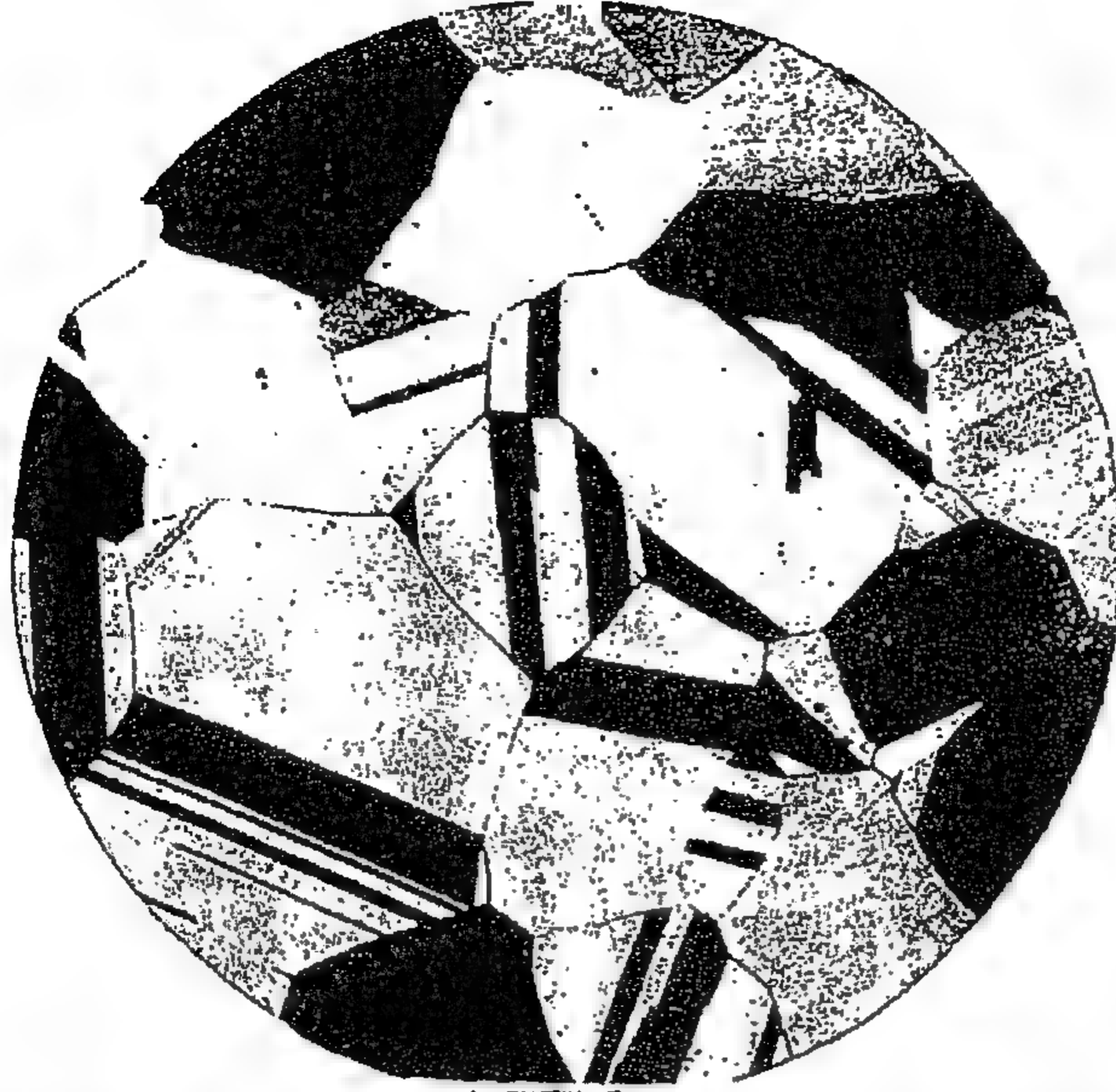
جدول (1-8) يبين 14 رقم حجم حبيبي ASTM .

رقم ASTM	حبيبه/mm ²	قطر الحبيبة التقريبي (μm)
-1	4	500
0	8	354
1	16	250
2	32	177
3	64	125
4	128	88.4
5	256	62.5
6	512	44.2
7	1024	31.2
8	2048	22.1
9	4096	15.6
10	8200	11.0
11	16400	7.81
12	32800	5.52

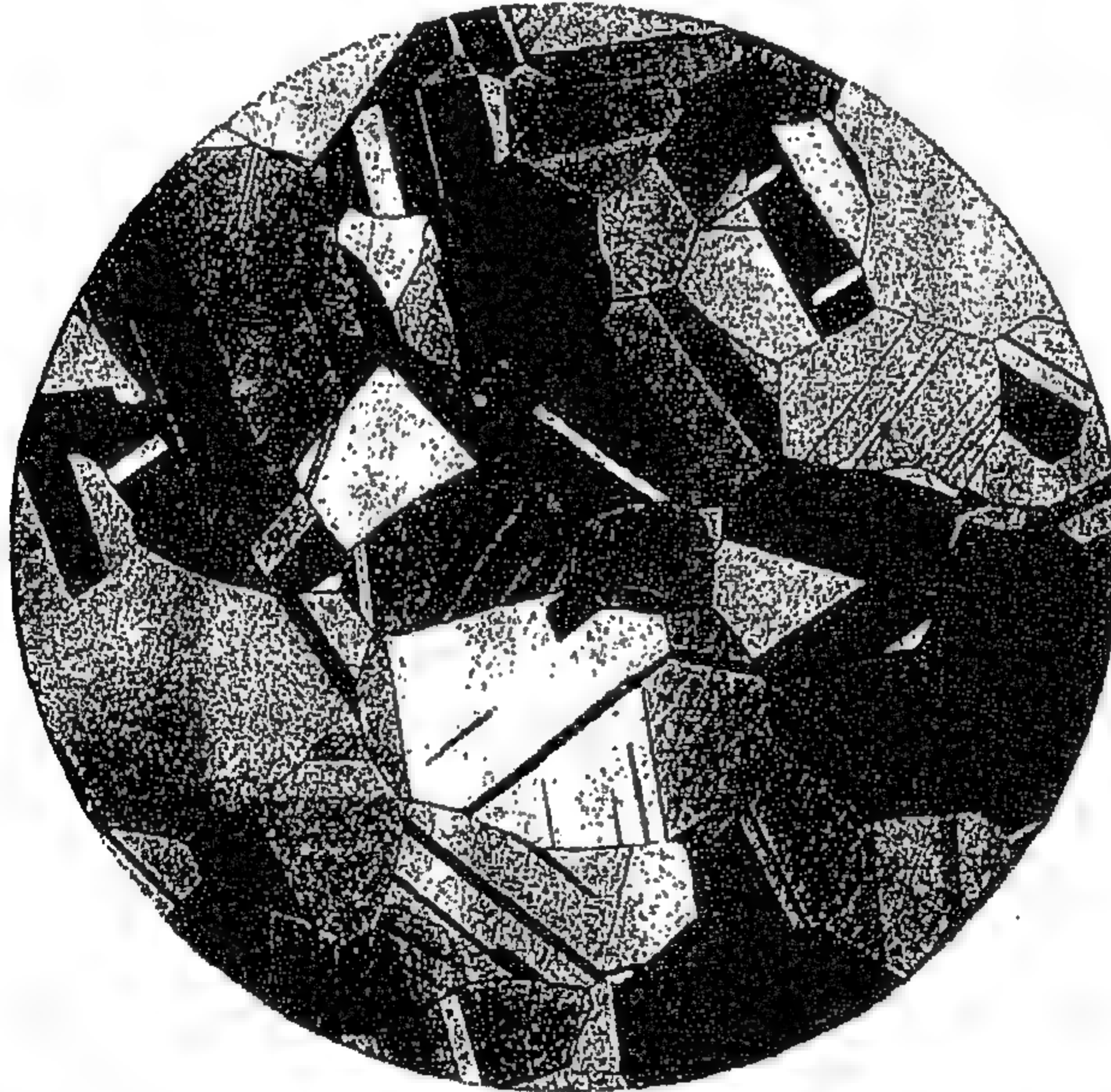
وعادة ما يكتفى بمعرفة رقم دليل الحجم الحبيبي (g) المطابق لبنية النموذج المحدد بدلاً من حساب n أو N_A .

هذا ما كان من أسلوب قياس السبائك الحديدية (ferrous alloys).

اما بالنسبة لقياس الحجم الحبيبي للسبائك والمعادن اللاحديدية (nonferrous alloys) فيمكن استخدام نفس أسلوب مقارنه البنية المجهرية للنموذج المراد قياس حجمه البلوري (الحبيبي) مع لوحات ASTM قياسيه أخرى (غير تلك التي استخدمت في قياس الحجم الحبيبي للسبائك الحديدية) وكما في الشكل (6-8). الخاص بلوحات البراص الفا (α -Brass) وعند تكبير قياسي مقداره 75 ضعفاً (75x). ان عدد هذه اللوحات عشرة مدرجة بدلالة معدل ابعاد الحبيبه (average grain dimensions) الحقيقيه وتتراوح بين 0.20mm وحتى 0.01mm . وطريقة المقارنة (ASTM) آنفة الذكر تصلح للحبيبات (البلورات) متساوية المحاور (equi-axed grains) فقط .

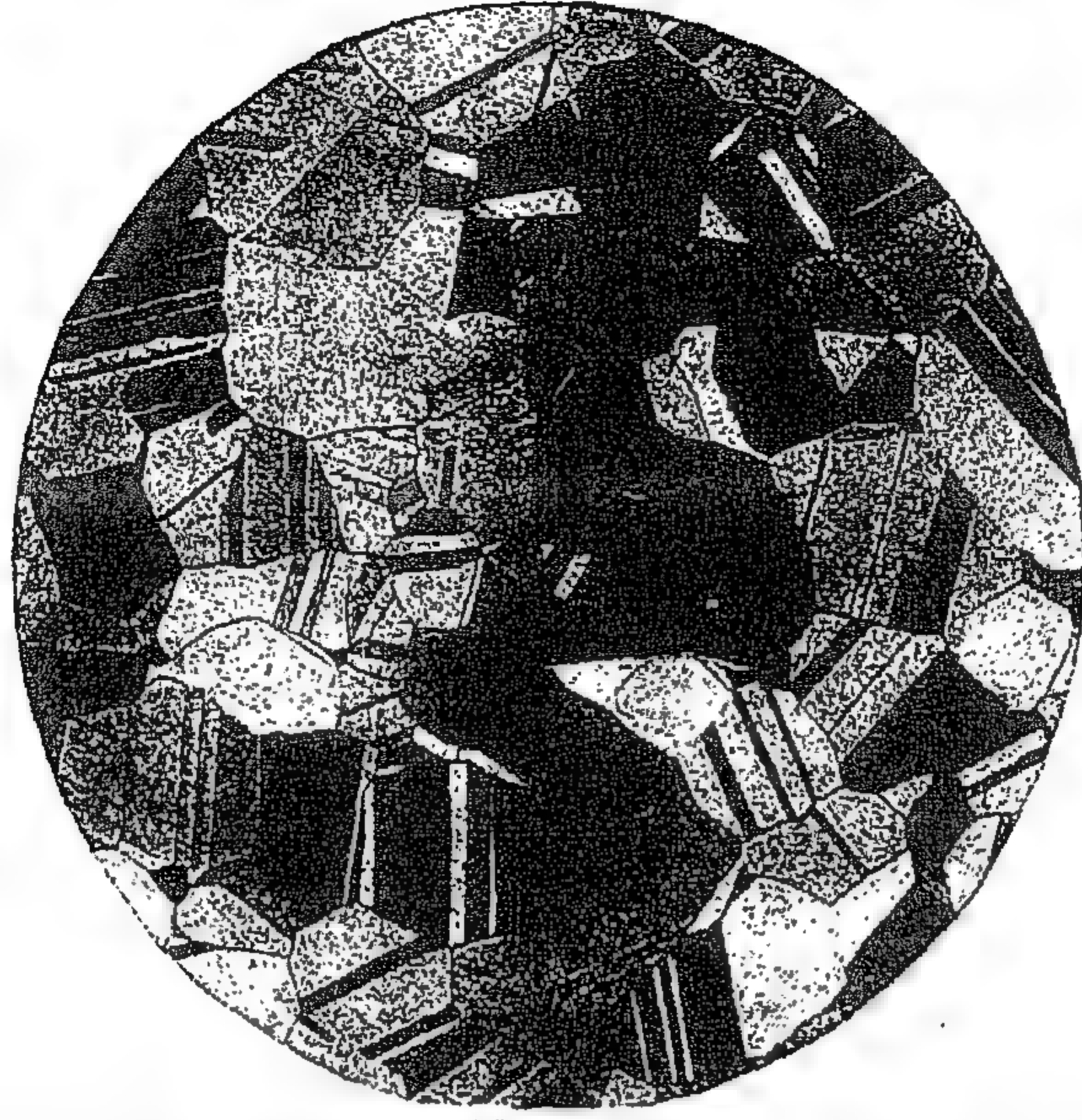


(a) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لاهديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.2mm.

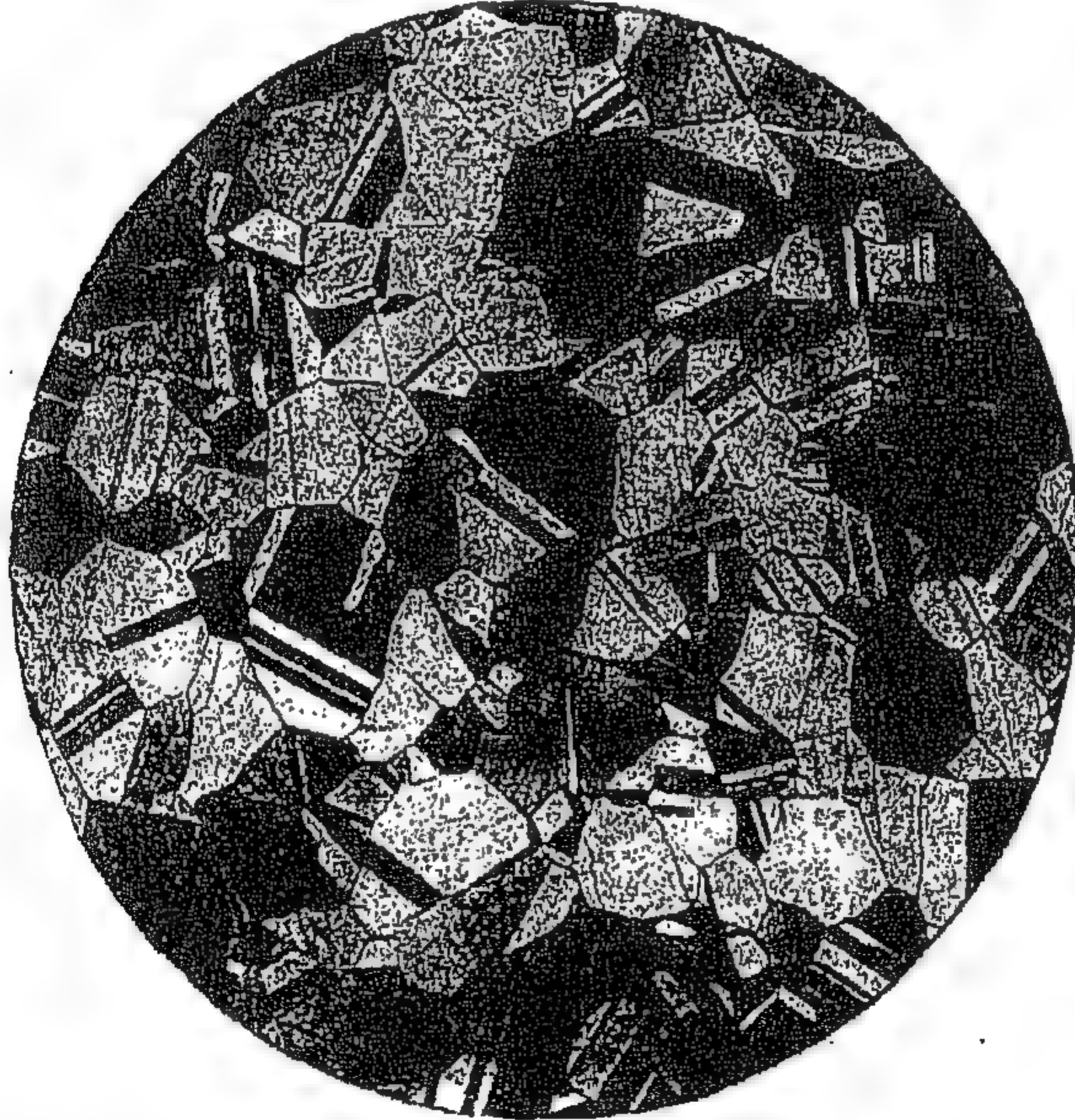


(b) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لاهديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.15mm.

الشكل (6-8) نماذج صور ASTM لحجوم حبيبية مختلفة (j,i,h,g,f,e,d,c,b,a) ولسبيكة لاهديدية (براص-الفا).



(c) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لا حديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.12mm.



(d) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لا حديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.15mm.



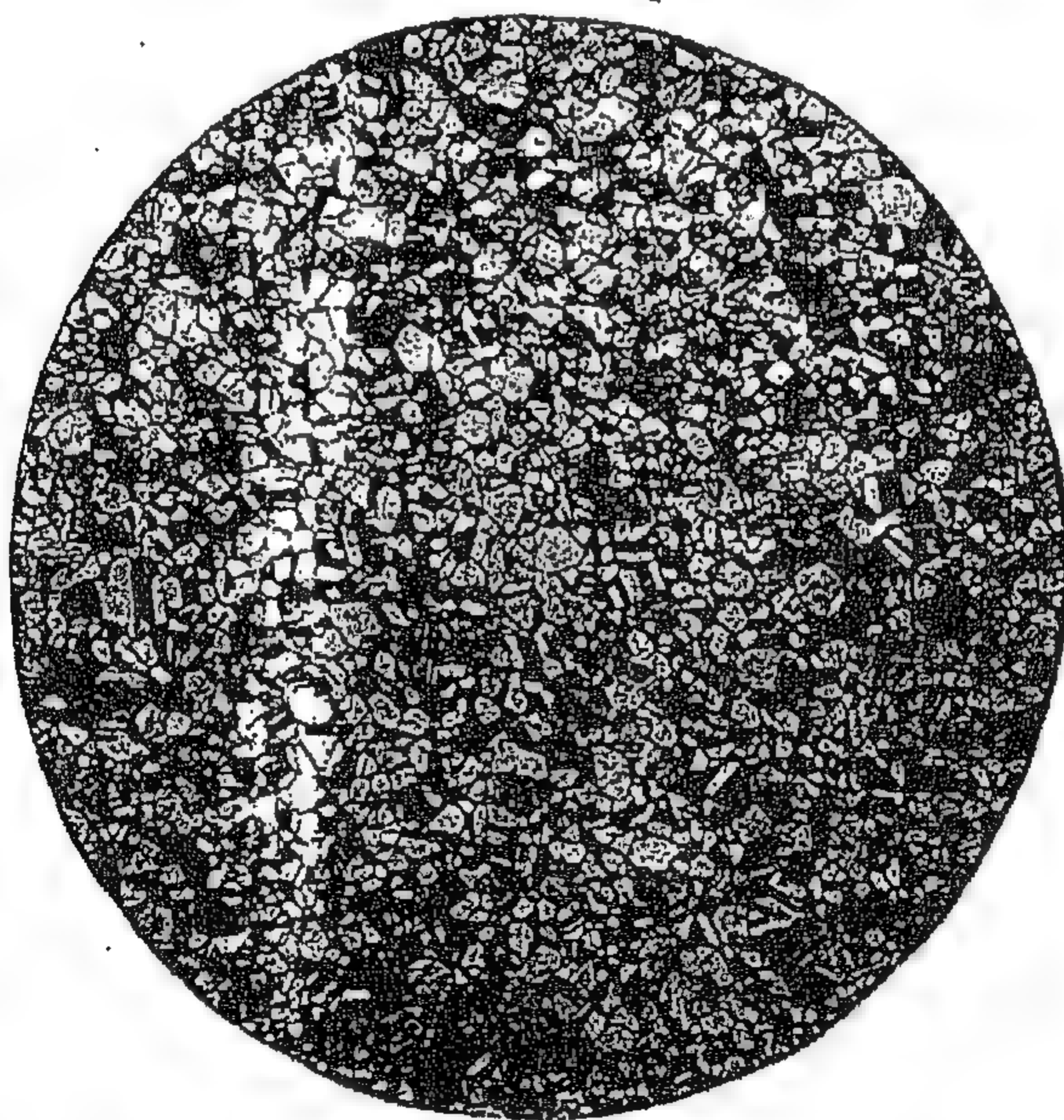
(e) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لا حديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.065mm.



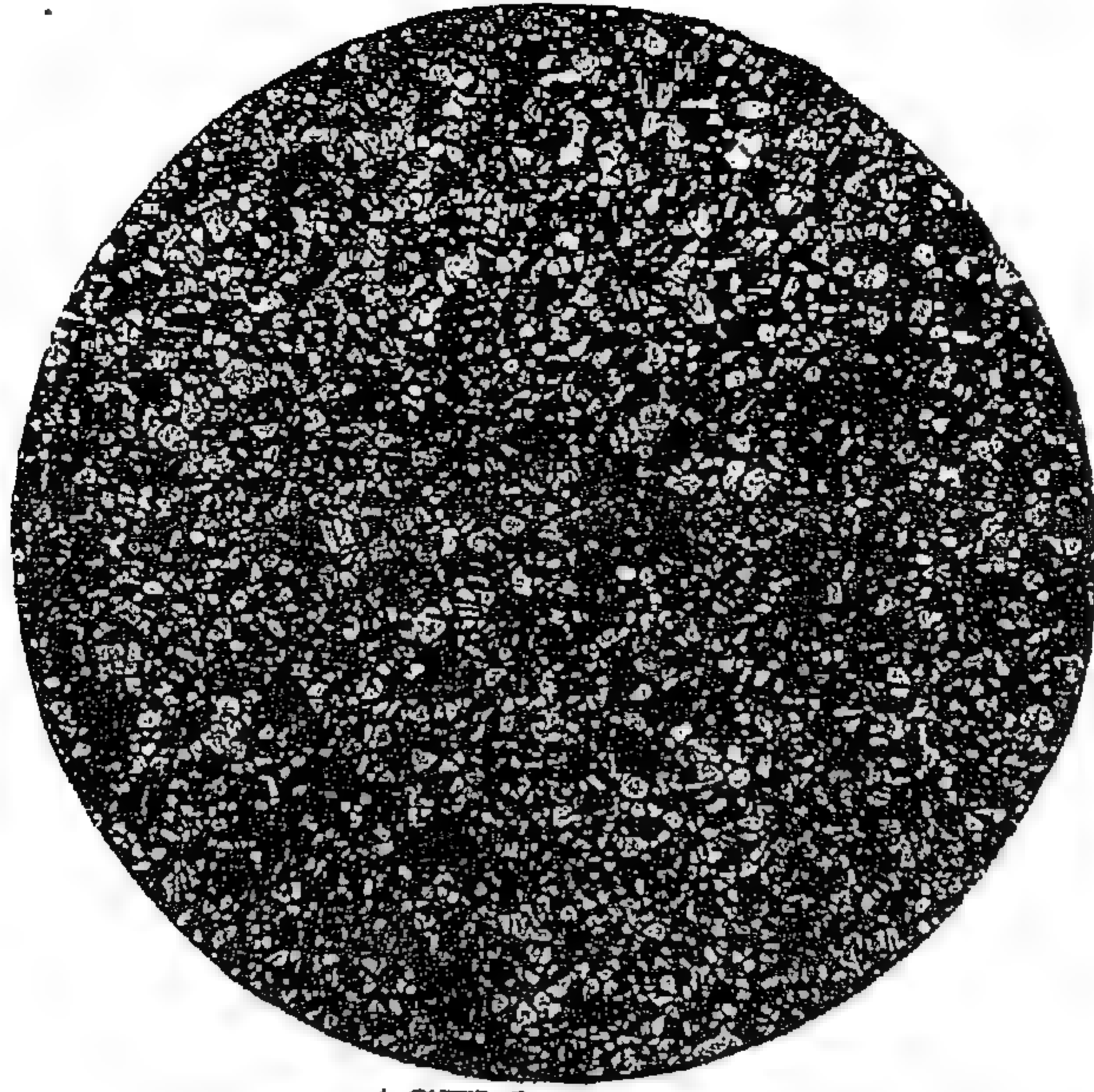
(f) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لا حديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.045mm.



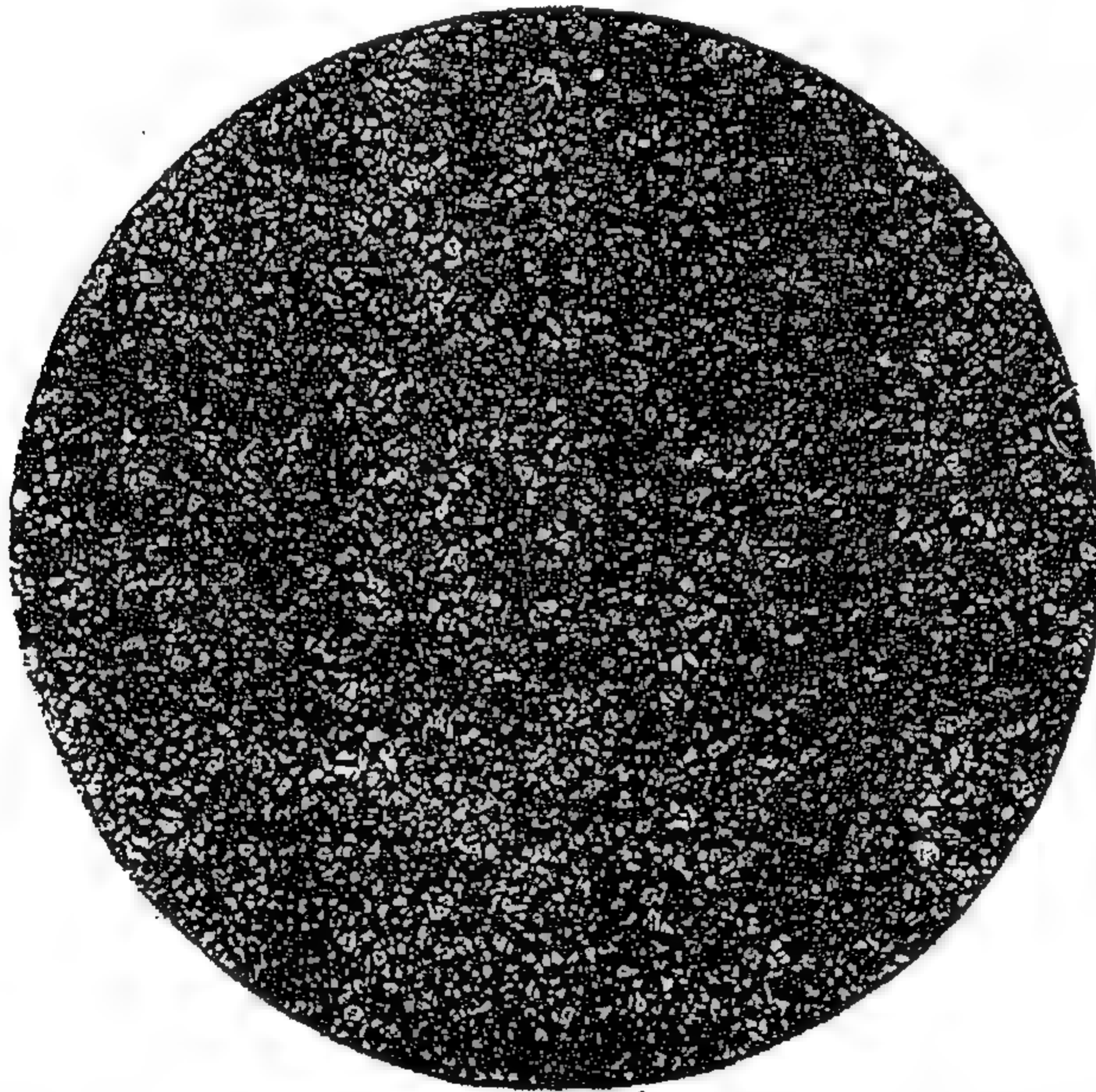
(g) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لا حديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.035mm.



(h) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لا حديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.025mm .



(i) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لا حديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.015mm.



(j) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لا حديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.01mm.

ان طريقة المقارنة آنفة الذكر هي طريقة سريعة النتائج وكثيرة الاستخدام في الصناعة خاصة وفي القياسات الروتينية عامة، إلا أنها تفتقر الى الدقة ولذلك لا تستخدم في البحوث العلمية او عندما تراد نتائج دقيقة ومطابقة للواقع. وعندئذٍ تستخدم إما طريقة جفريز او طريقة معدل التقاطع الخطي حيث ان الاخيرة اكثر استخداماً لاسباب سوف تذكر فيما بعد.

٢- الطريقة المساحية (طريقة جفريز): (Planimetric Method (Jeffries)

طوّرت الطريقة المساحية من قبل جفريز، ثم استخدمت لسنوات عديدة في قياس عدد الحبيبات في وحدة المساحة لمقطع مستو، حيث يمكن ان تقارن هذه الطريقة مع تدرج عدد الحجم الحبيبي للجمعية الامريكية (ASTM). وقد استعيض في السنوات الاخيرة عن هذه الطريقة بطريقة معدل التقاطع الخطي التي سيأتي ذكرها وذلك لانها أبسط في الاستخدام وأكثر ملائمة لمختلف البنى المجهرية.

يتم تنفيذ طريقة جفريز، بشكل عام، برسم دائرة (أو مستطيل) ذات قطر مقداره 79.8mm (مساحتها 5000mm²) على الصورة المجهرية مباشرة او على ورقة شفافه كما في الشكل (7-8). يتم تغيير قوة تكبير المجهر بحيث تتضمن مساحة الدائرة ما لا يقل عن (50) حبيبه. تحسب عدد الحبيبات التي تكون ضمن الدائرة تماماً وليكن (n₁) ثم عدد الحبيبات التي تتقاطع مع المحيط وليكن (n₂). فيكون مجموع الحبيبات الواقعة فعلاً ضمن الدائرة هو (N) فيكون:

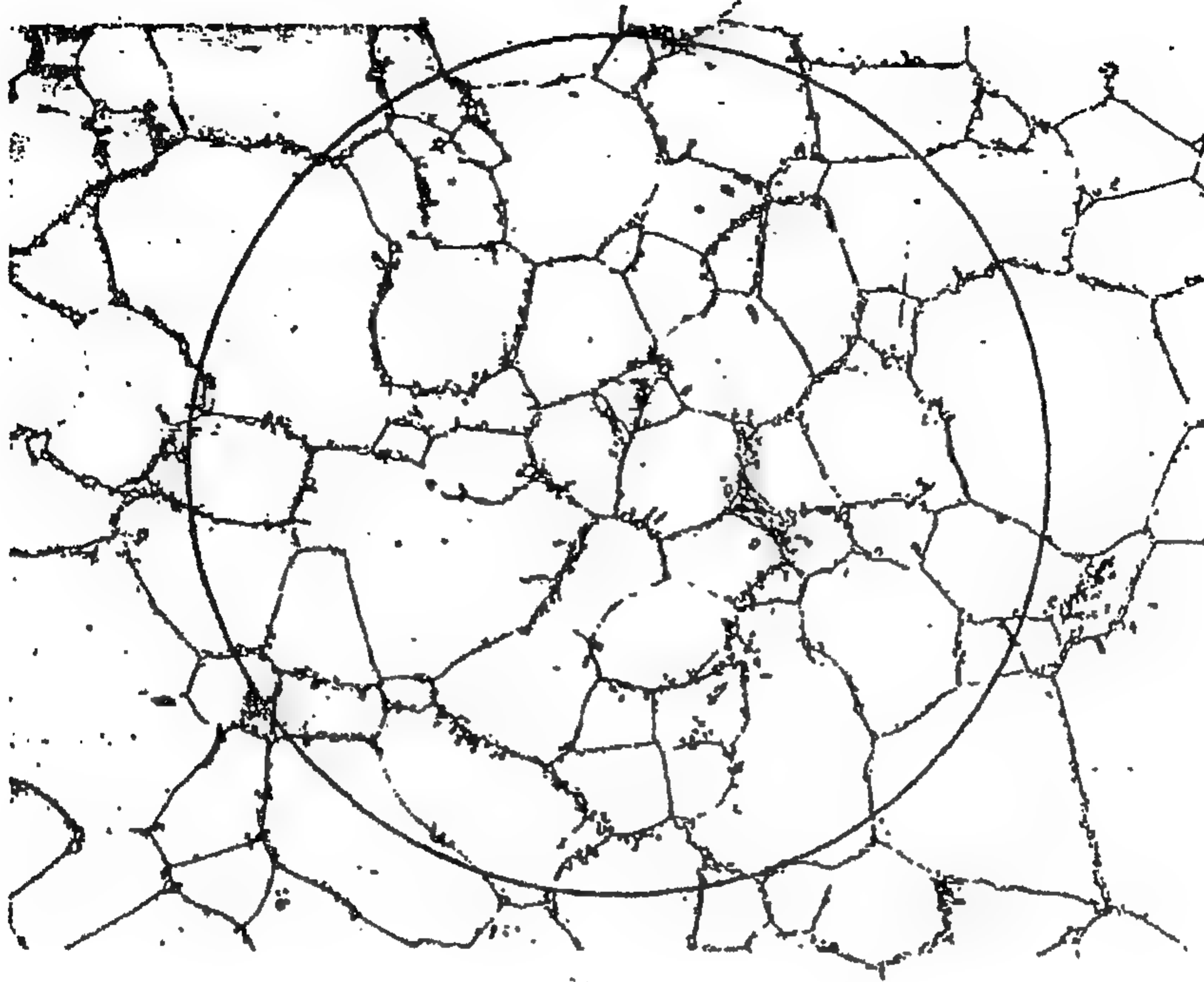
$$N = n_1 + \frac{n_2}{2} \quad \text{..... (7-8)}$$

أما عدد الحبيبات في المليمتر المربع الواحد (N_A) فيحسب كالاتي:

$$N_A = f(n_1 + \frac{n_2}{2}) \quad \text{..... (8-8)}$$

f هو معامل جفريز الخاص بالتكبير المستخدم (M) حيث يكون:

$$f = \frac{M^2}{5000} \quad \text{..... (9-8)}$$



الشكل (7-8) يبين كيفية قياس الحجم الحبيبي بالطريقة المساحية (طريقة جفرينز (Jeffries).

ان ا لدائرة المبينه في الشكل لها قطر=79.8mm اي بمساحة 5000mm^2 . ان تكبير الصورة اعلاه 100X. وقد تم حساب عدد الحبيبات ضمن هذه المساحة وقد ظهر ان : 44 حبيبه تقع داخل هذه الدائرة تماماً و

$$25 \text{ حبيبه تتقاطع مع المحيط.}$$

$$f (\text{معامل جفرينز}) \text{ للتكبير } 100X = 2 = \frac{(100)^2}{5000}$$

فيكون عدد الحبيبات بالميلي متر المربع الواحد (N_A)

$$N_A = 2 \left(44 + \frac{25}{2} \right) = 113$$

أما معدل مساحة الحبيبه (\bar{A}) فهو

$$\bar{A} (\text{mm}^2) = \frac{1}{N_A} \quad \dots\dots\dots (10-8)$$

وبذلك يكون معدل قطر الحبيبه (d) هو :

$$\bar{d} (\text{mm}) = \sqrt{\bar{A}} = \frac{1}{\sqrt{N_A}} \quad \dots\dots\dots (11-8)$$

٣- طريقة معدل التقاطع الخطي Mean linear intercept method :

تستلزم طريقة هاین التأشير على الصورة المجهرية ا وعلى ورقة شفافة للحصول على العدد المضبوط، ولذا كانت الطريقة بطيئة نسبياً. يمكن الحصول على سرعة عالية في القياسات وبنفس الضبط باستخدام تقنية عد التقاطعات . وحيث ان عنصر الفحص في هذه الطريقة هو خط بدلاً من مساحة فيمكن الحصول على عد دقيق بدون الحاجة الى التأشير على الصورة. وفي الواقع يمكن استخدام شبكة خطوط (أو خط واحد) موضوعه على العدسه العينية وبذلك يمكن تجنب استخدام الصور وبنفس الدقة في العمل. يمكن تنفيذ طريقة معدل التقاطع الخطي لحساب الحجم الحبيبي بجزء من الوقت اللازم عند استخدام طريقة جفريز. وهذا الوقت اكثر بقليل من الوقت اللازم عند استخدام طريقة المقارنة الامريكية. تعتبر طريقة التقاطع الخطي الطريقة الأكثر ملائمة في قياس الحبيبات غير المتساوية الابعاد. كما ان عدد التقاطعات بوحدة الطول (N_L) تتناسب بصورة مباشرة مع المساحة السطحية بوحدة الحجم (S_V) للحدود البلورية (الحبيبية) وكالاتي :

$$S_V = 2N_L \quad \dots\dots\dots (12-8)$$

يمكن تنفيذ هذه الطريقة باستخدام خط مستقيم او منحنى ذو طول كلي (L_T) معلوم بحيث يتم رسمه على الصورة مباشرة ، كما في الشكل (8-8). او على ورقة شفافة او يكون موضوعاً على العدسة العينية، كما مر ذكره. يتم اختيار التكبير الملائم بحيث يكون عدد الحدود الحبيبية المتقاطعة مع خط القياس (N) لا يقل عن 50

ولا يزيد عن 150 ويمكن حسابها بشكل مضبوط. يعتبر كل حد حبيبي يتقاطع مع خط القياس نقطه واحده اما إذا تقاطعت نقطه ثلاثية للحدود الحبيبيه (نقطة التقاء ثلاث حبيبات) مع الخط فتحسب $\frac{1}{2}$ نقطة في حين تعتبر نقطة تماس الحد الحبيبي مع خط القياس ($\frac{1}{2}$) نقطة فقط، وهكذا يمكن حساب مجموع التقاطعات الفعلية (N).
يحسب مقدار التقاطع بوحدة الطول (N_L) كالآتي:

$$N_L = \frac{NM}{L_T} \quad \text{..... (13-8)}$$

حيث يمثل L_T الطول الكلي للخط المستقيم المستخدم في القياس
M مقدار تكبير الجهاز.

فيكون مقدار الحجم الحبيبي لمعدل التقاطع الخطي هو

$$\bar{L} = \frac{1}{N_L} \quad \text{..... (14-8)}$$

ولو تم أخذ نموذج متعدد السطوح (Tetrakiadecahedron) ليمثل الحبيبه فعندئذ تكون العلاقة بين الحجم الحقيقي للحبيبة (d) والحجم الحبيبي لمعدل التقاطع الخطي (\bar{L}) هي:

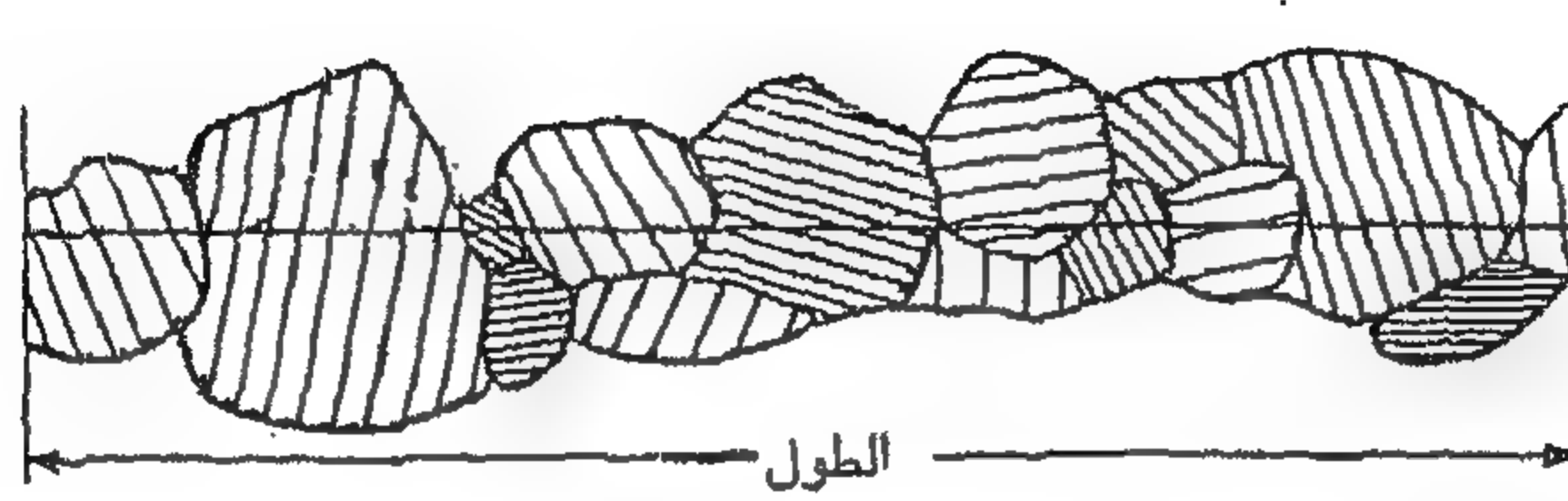
$$d = 1.77 \bar{L} \quad \text{..... (15-8)}$$

كما ان هناك علاقة تربط بين (\bar{L}) وعدد الحجم الحبيبي بطريقة ASTM (g) وهي:

$$g = [-6.6457 \log \bar{L}] - 3.298 \quad \text{..... (16-8)}$$

ومن ميزات هذه الطريقة انه يمكن معرفة مقدار الاستطالة النسبيه في الحبيبات او مقدار التشكيل الذي اجري على السبيكة، عند استخدام خط مستقيم في القياس. حيث تؤخذ قياسات باتجاه محاور الحبيبات اولاً ثم تؤخذ قياسات اخرى باتجاه عمودي على الإتجاه الاول ولنفس العدد من الحبيبات. ومن نسبة القراءات الثانية الى الأولى يمكن التنبؤ بمقدار التشكيل بفرض ان الحبيبات كانت متساوية المحاور قبل التشكيل.

وإذا اريد التقليل من الخطأ الاحصائي (statistical error) فمن المستحسن اخذ مالا يقل عن 500 حبيبه لتعيين الحجم الحبيبي وفي مناطق واتجاهات مختلفة من النموذج ولعدة نماذج لاستخراج المعدل الذي يمثل النموذج المفحوص فعلاً.



الشكل (8-8) يوضح طريقة معدل التقاطع الخطي لتعيين الحجم الحبيبي.

في هذا الشكل :

عدد التقاطعات مع الحدود البلورية 8

عدد نقاط التماس مع الحدود البلورية صفر.

عدد النقاط الثلاثية المار بها الخط 1

$$9.5 = 1 \times \frac{1}{2} + \text{صفر} + 8 = \text{مجموع التقاطعات الفعلية}$$

٨-٨ قياس حجم (مقاس) الدقائق : Measurement of particle Size

لقد تم ذكر انه يمكن تعيين الكسر الحجمي (Volume fraction) (Vv) للطور المتشتت (dispersed phase) بطرائق بسيطة هي الخطية (lineal) والمساحية (areal) او التحليل النقطي . ولا يعتمد هذا التعيين على اشكال الدقائق التي قد تكون

لها سواء كانت أشكال مثالية ام لا . وهذا غير صحيح بالنسبة لمشكلة تقدير عدد الدقائق بوحدة الحجم وأبعاد الدقائق . ففي كلتا الحالتين يجب معرفة شكل الدقائق . وعلى المستوى العملي يجب ان يتمكن الشخص من ان يقرر ان شكل الطور المنتشر (المتشتت) كروي او قرصي او يأخذ شكل القضبان (rods) او اي شكل هندسي مثالي . لقد تم اشتقاق العلاقات الخاصة بكثافة الدقائق وابعادها باستخدام معلومات (Parameters) مقاسه على مقاطع مصقوله (Polished) . وكل علاقه تتعلق بشكل هندسي معين وعلى فرض ان حجمها ذو توزيع منتظم . أما بالنسبة الى حالات التوزيع غير المنتظم للحجم فيجب ان تؤخذ بصوره منفصلة .

حجم وتوزيع الدقائق الكروية Size and Distribution of Spherical Particles

يمكن تعيين عدد من الماهيات من قياسين هما N_L و N_A حيث يمكن أخذهما من المقاطع المستوية وحسب الباحث فلمان (Fullman) فإذا كان :

$$N_A = \text{عدد الدقائق بوحدة المساحة}$$

$$N_L = \text{عدد الدقائق في وحدة طول الخط .}$$

$$r = \text{معدل نصف قطر الدقائق الكروية .}$$

فتكون العلاقة

$$r = \frac{2}{\pi} \frac{N_L}{N_A} \quad \text{..... (17-8)}$$

ويكون عدد الدقائق الكروية بوحدة الحجم N_V هو

$$N_V = \frac{\pi}{4} \frac{N_A^2}{N_L} \quad \text{..... (18-8)}$$

وبالإضافة الى التحليل الخطي والمساحي والنقطي فإن الكسر الحجمي للدقائق الكروية المنتشرة يمكن ان يحسب كالاتي :

$$V_V = \frac{8}{3\pi} \frac{N_L^2}{N_A} \quad \text{..... (19-8)}$$

حجم وتوزيع الرقيقة الخفيفة ذات الشكل القرصي:

Size and distribution of thin circular plate- shaped particles

اعطى فلمان (Fullman) الصيغ الرياضية الآتية التي تنطبق على الدقائق ذات الشكل القرصي المثالي:

$$r = \frac{N_L}{N_A} \quad \dots\dots\dots(20-8)$$

$$t = \frac{V_V}{2N_L} \quad \dots\dots\dots(21-8)$$

$$N_A = \frac{2}{\pi} \frac{N_A^2}{N_L} \quad \dots\dots\dots(22-8)$$

حيث r = نصف قطر القرص و t = سمكه على ان يكون $t \ll r$.

حجم وتوزيع الدقائق الطويلة التي هي بشكل قضبان نحيفة:

Size and distribution of long, thin rod - shaped particles

اعطى فلمان (Fullman) الصيغ الآتية للقضبان النحيفة والطويلة

$$r = \frac{1}{\pi} \frac{N_L}{N_A} \quad \dots\dots\dots(23-8)$$

$$V_V = \frac{2}{\pi} \frac{N_L^2}{N_A} \quad \dots\dots\dots(24-8)$$

حيث r = نصف قطر القضيب و L يمثل طوله وأن : $L \gg r$.

يلاحظ في هذه الحالة ان طول القضبان لا يمكن ان يحسب او يقدر من قياسات المقاطع السطحية.

حجم وتوزيع الدقائق الاهليجية :

Size and distribution of ellipsoidal particles

هناك نوعان من الأجسام الاهليجية وهما شبه الكرة المتطاول (prolate ellipsoid) والذي يتشكل من دوران الجسم الإهليلجي حول قطره الأكبر (a) وشبه الكرة المفلطح (oblate ellipsoid) والذي يتشكل من دوران الجسم الاهليجي حول قطره الأصغر (b). ومن الضروري تعريف الملمات الخاصة بالجسم الاهليجي.

g هي النسبة المحورية $\frac{b}{a}$ للجسم الاهليجي الهندسي المتولد.

$k_p(g)$ و $k_o(g)$ هما حدان مجردان واللذان يعتمدان على (g) .

\bar{F}_o و \bar{F}_p هما معدلا قيم النسبة بين المحور الأكبر الى المحور الأصغر للأشكال الاهليجية المتكونة من المقاطع المستوية العشوائية لكلا نوعي الاجسام الاهليجية المنتشرة في البنية التي يمكن الحصول عليها من معدل عدد كبير من القياسات التي تجرى على البنية. ان كلاً من \bar{F}_o و \bar{F}_p تعتمد على g اوهي دالة لها. \bar{Z}_o و \bar{Z}_p يمثلان معدل القيم لمقلوبات المحاور الصغرى للمقاطع الاهليجية. يمكن أيضاً استخراج هذه القيم من اجراء القياس على عدد كبير من الدقائق الاهليجية الموجودة في البنية.

وباستخدام الملمات آنفة الذكر فقد تم تعريف عدد الدقائق بوحدة الحجم ومعدل

ابعاد المحاور الكبرى والصغرى (major and minor axes) للدقائق الاهليجية الشكل :

$$N_v = \frac{2N_A \bar{Z}_p}{\pi k_p(g)} \text{ or } \frac{2N_A \bar{Z}_o}{\pi g k_o^2(g)} \quad \dots\dots\dots (25-8)$$

$$\bar{b} = \frac{\pi}{2 \bar{Z}_p} \text{ or } \frac{\pi g^2 \cdot k_o(g)}{2 \bar{Z}_o} \quad \dots\dots\dots (26-8)$$

$$\bar{a} = \frac{\pi}{2 g \cdot \bar{Z}_p} \text{ or } \frac{\pi g \cdot k_o(g)}{2 \bar{Z}_o} \quad \dots\dots\dots (27-8)$$

أشكال الدقائق غير المنتظمة : Irregular particle shapes

تشكل الدقائق غير المنتظمة ذات الحجوم المختلفة ، مشكله حقيقية فقد تم اقتراح بعض الطرائق للتعامل مع مثل هذه الحالات لكنها اما ان تكون صعبة جداً او غير دقيقة نهائياً وفي الغالب كلا الحالتين معاً.

معدل المسار الحربي بين الدقائق : Mean Free Path between Particles

يعرّف معدل المسار الحر (λ) بأنه معدل المسافة بين السطوح الخارجيه للدقائق الموجوده او المنتشرة في البنية، وهي تعطى بالمعادلة الآتية:

$$\lambda = \frac{1 - V_v}{N_L} \quad \dots\dots\dots (28-8)$$

يمكن تطبيق هذه المعادلة لأي توزيع وحجم وشكل للدقائق.

..

؟ ٣٣٠

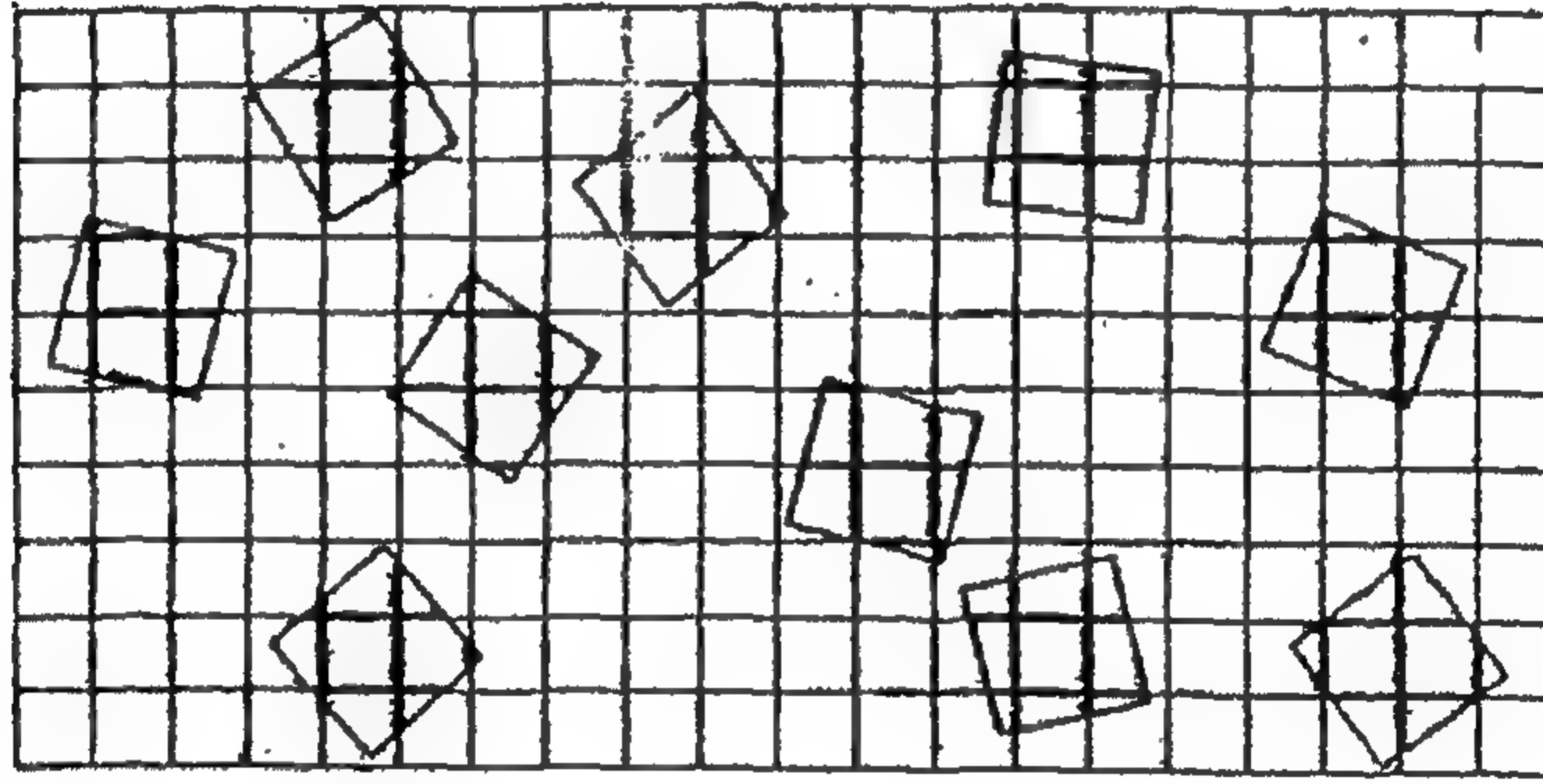
٣٣٠

تمارين الفصل الثامن

١- اشرح باختصار معنى الميتالوجرافيا الكمية (Quantitative Metallography) وما الغاية المتوخاة منها .

٢- عرّف ما يأتي : الكسر الحجمي والكسر المساحي والكسر الخطي والكسر النقطي ثم اذكر اي التقنيات أكثر استخداماً عند قياس الكسر الحجمي .

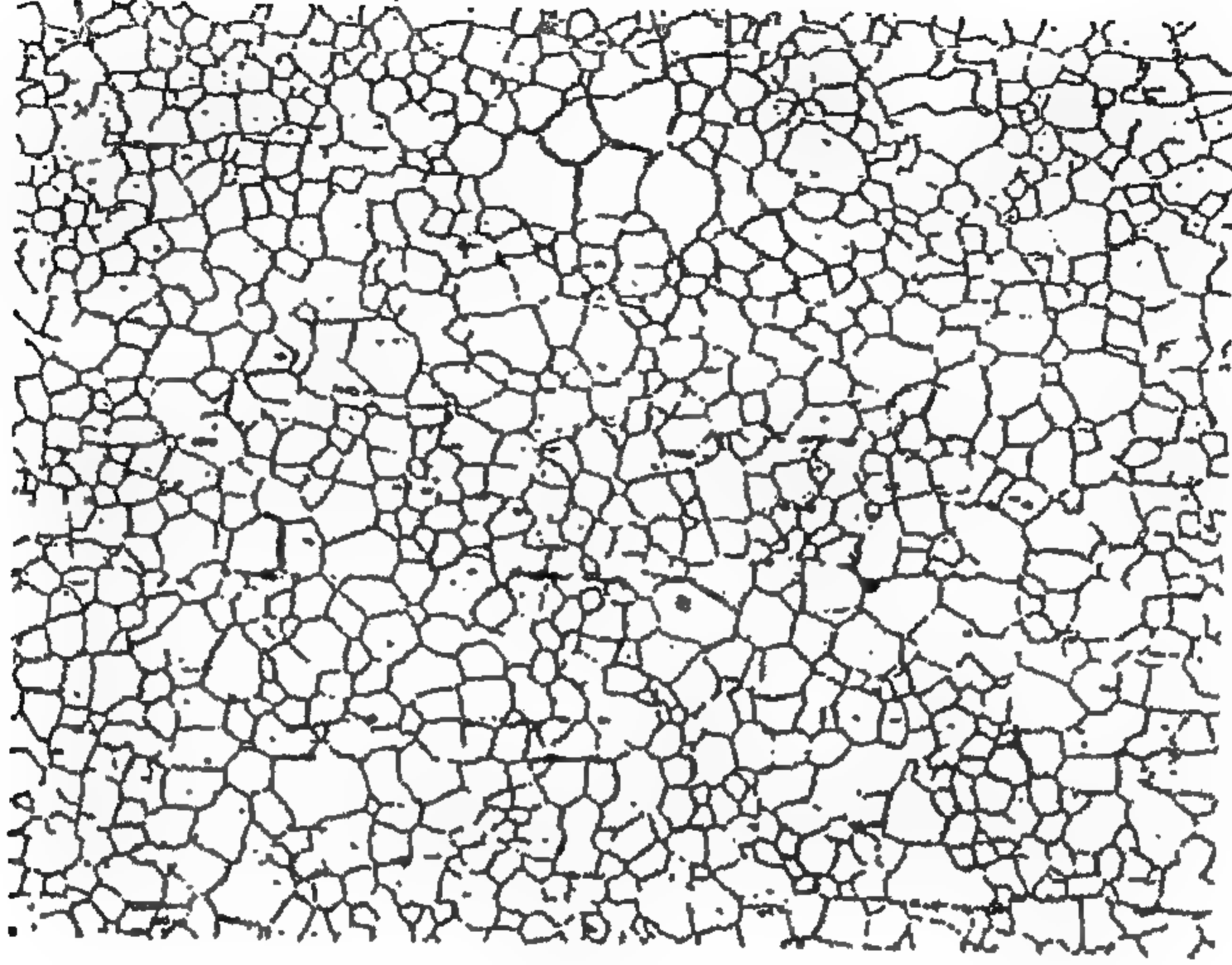
٣- احسب الكسر الحجمي للمربعات المنفصلة العشوائية الترتيب (باعتبارها طور ثاني) والمبينه في الشكل المجاور بالتقنيات الثلاث الكسر المساحي والكسر الخطي والكسر النقطي، ماذا تستنتج من ذلك ؟



٤- عدد طرائق قياس الحجم الحبيبي، واذكر ايها أفضل ولماذا .

٥- قس الحجم الحبيبي في بنية نموذج مبينه في الشكل ادناه، باحدى طرائق القياس المعروفة، ثم احسب الحجم الحبيبي الحقيقي .

٦- ماهي أهم النقاط التي يجب ان تُراعى عند دراسة بعض الماهيات في البنية الدقيقة للعينة . وكيف يمكن التقليل من الحيود او الخطأ فيها.



مقدار التكبير 150 x

الفصل التاسع

المقاومة الكهربائية وبعض تطبيقاتها في الفحص

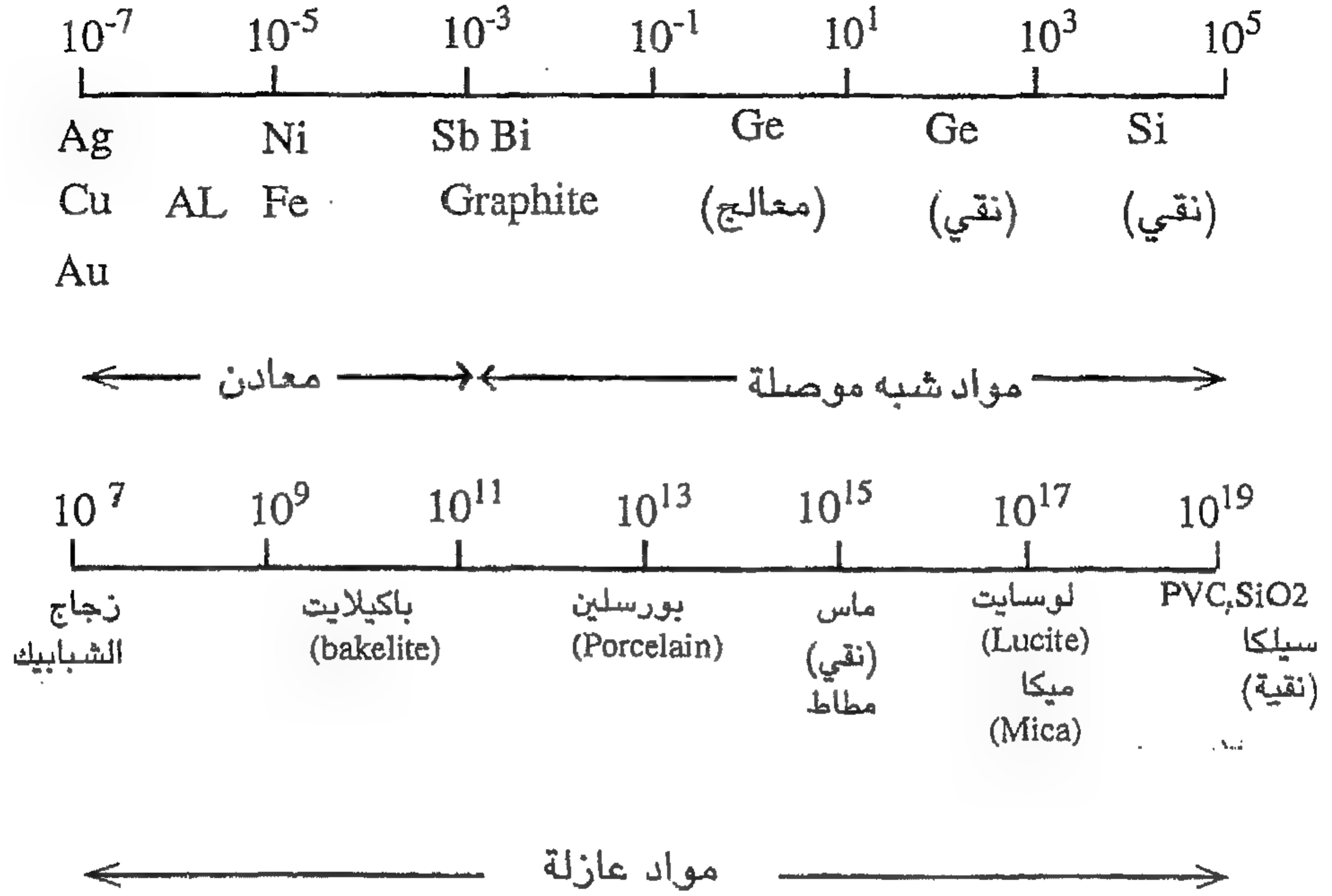
٩-١ المقدمة:

تحدد الالكترونات في المدارات الخارجية للذرات السلوك الكهربائي والمغناطيسي والحراري والضوئي للمواد الصلبة . وسيتم تقديم نموذج الالكترون الحر في هذا الفصل بعد تقديم وصف مختصر للمدى الكامل لمقاومية (resistivity) المواد. ومن ثم تناقش المواد الموصلة للتيار الكهربائي والمقاومة له وأخيراً أشباه الموصلات.

٩-٢ مدى المقاومة:

لعل المقاومة الكهربائية للمواد الصلبة من أكثر الخواص الفيزيائية جداره بالملاحظة لأنها تتغير بمدى يربو على 25 مرتبه. ولتصور هذا المدى الواسع يمكن ملاحظة الجدول (1-9)، الذي يتضمن مدى المقاومة الكهربائية لعدد من المواد الهندسية المهمة عند درجة حرارة الغرفة. ويمكن تقسيم هذا المدى الى ثلاثة اصناف. فالمواد الموصلة هي المعادن والسبائك ويعتبر الذهب والفضة والنحاس من أفضل الموصلات الكهربائية يليها في ذلك الألمنيوم. أما المعادن الانتقالية كالحديد والنيكل فلا تمتلك تلك التوصيلية التي تمتلكها المعادن المذكورة آنفاً. كما أن هناك ما هو أقل توصيلية مما ذكر وتلك هي اشباه المعادن والتي تحتل العمود الخامس في الجدول الدوري مثل الانتيمون والبزموت. يقع الكرافيت ضمن صنف اشباه المعادن ايضاً. يقع مدى المقاومة الكهربائية للمواد الموصلة بين 10^{-7} الى 10^{-2} ohm-cm.

جدول (1-9) تدرّج المقاومة الكهربائية (ohm - cm).



أما الصنف الثاني وهي أشباه الموصلات فتقع مقاومته في مدى 10^{-1} الى 10^5 ohm-cm. ويشكل هذا الصنف الاساس لاجهزة الحالة الصلبة. وتتأثر المقاومة هنا بشكل كبير بالتراكيز القليلة للشوائب. فالجرمانيوم المعالج بمحتوى قليل لأحد الشوائب وبحدود عدة اجزاء من المليون يمتلك مقاومة اقل بمرتبتين عما يمتلكه الجرمانيوم ذو النقاوة العالية جداً. كما يمتلك السليكون النقي مقاومة اعلى مما يمتلكه الجرمانيوم النقي.

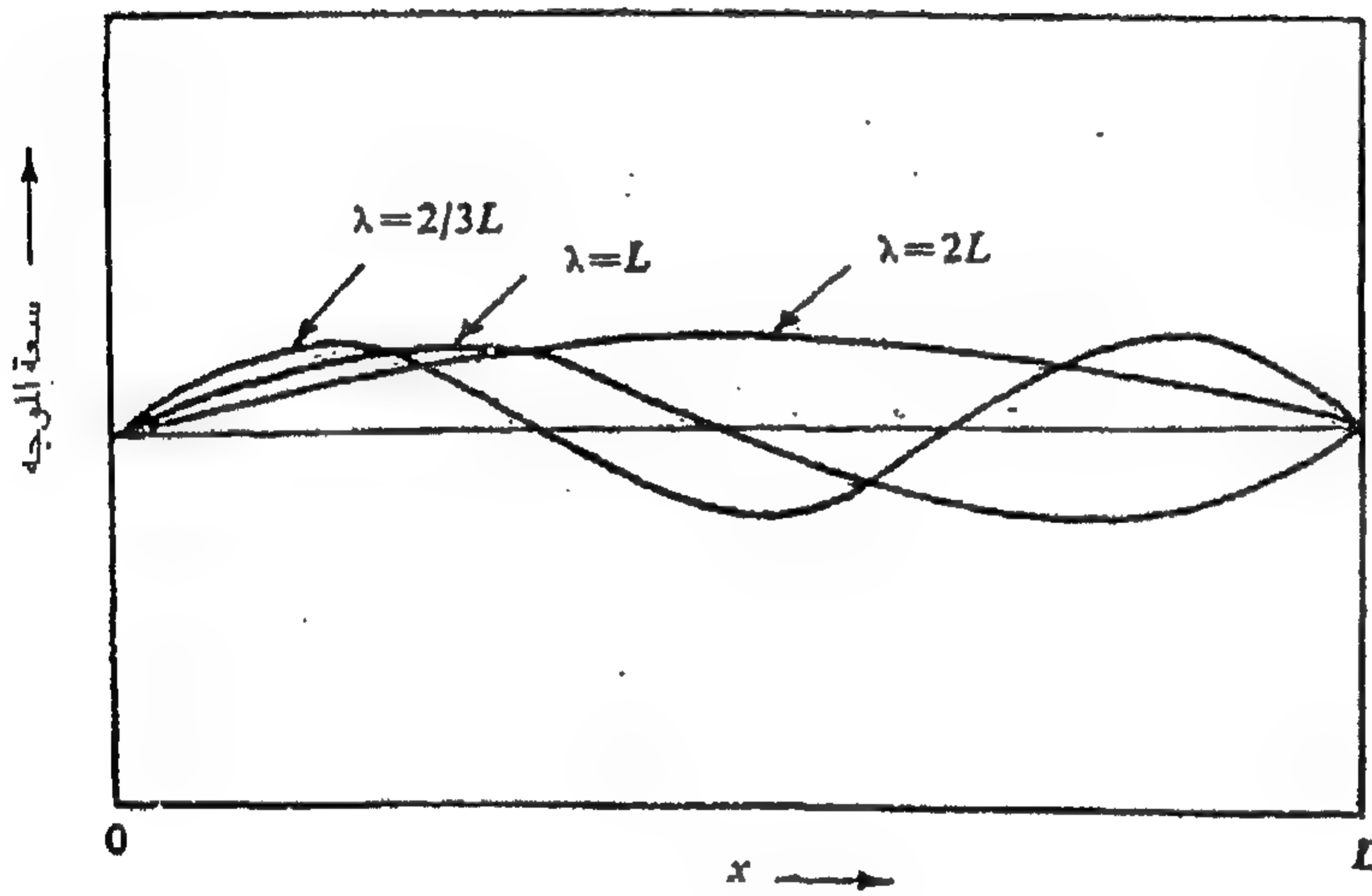
ويدعى الصنف الثالث من المواد بالعوازل. والمواد العازلة المألوفة هي البكالايت (bakelite) واللوسايت (Lucite) والمايكا (mica) وكلوريد البولي فنيل (PVC) والمطاط و البورسلين (Porcelain). و يقع مدى المقاومة لهذا الصنف بين 10^8 الى اعلى من 10^9 ohm.cm ويوجد فرق بحدود 13 مرتبة بين القيم الملاحظة لزجاج

السليكا وزجاج الشبائيك و يعزى هذا الفرق الى التوصيلية الايونية لزجاج الشبائيك . فالأيونات الموجبه للصوديوم والكالسيوم الموجوده في زجاج الشبائيك وغير المرتبطة نسبياً تنتشر وتعمل على التوصيل اذا ما قورنت بأيونات السليكون الموجبة غير المتحركة والمرتبطة بشده في السليكا.

٣-٩ نظرية الإلكترون الحر:

لا تعتبر خواص التوصيل للمادة الصلبة دالة لعدد جميع الإلكترونات فيها، حيث ان الإلكترونات التي في المدارات الخارجية للذرات فقط لها دور في التوصيل. وتعد الإلكترونات الخارجيه في الذرات حسب نظرية الإلكترون الحر غير مرتبطة بالذره بل يمكن ان تتحرك بحرية في كل المادة الصلبه . ولذلك سميت هذه الإلكترونات بغمامة الإلكترونات الحرة او بالغاز الإلكتروني الحر او غاز فيرمي (Fermi gas) . يعتبر الفرض الأساس في نظرية الإلكترونات الحره هو ان مجال الجهد الناتج من لب الايونات يكون منتظم خلال المادة الصلبه ولذلك فالإلكترونات الحره تمتلك نفس الطاقة الكامنة اينما كانت في المادة الصلبه. تأخذ الطاقة الكامنه قيمة محدودة سالبه نتيجة للجذب الكهربائي بين الإلكترون الحر ولب الايونات وحيث اننا نعنى هنا بفروق الطاقة فقط لذلك يمكن فرض ان هذه الطاقة الكامنه الثابته مساوية للصفر لاجل التبسيط. وعندئذ تكون الطاقة الوحيدة التي تمتلكها الإلكترونات الحرة هي الطاقة الحركية. ان الطاقة الحركية هذه اقل بكثير من طاقة الإلكترونات المرتبطة في ذره معزولة لان مجال حركة الإلكترون يتوسع بصورة ملحوظة في المادة الصلبة مقارنة بالمجال حول ذرة واحدة. ان طول موجه دبرولي (deBroglie) للإلكترونات الحره ذات الطاقة الحركية الاقل تساوي ضعف طول الجسم الصلب الخطي كما في الشكل (9-1) (والمقصود بالجسم الصلب الخطي ان حركة الإلكترون ذات اتجاه واحد). وعلى سبيل المثال فالجسم الصلب الذي طوله واحد او اثنين من السنتيمترات، فالطول الموجي في هذه الحالة يكون اكبر في

المقدار بحوالي سبعة الى ثمانية مراتب عما هو عليه في الذرة الحرة. والاحتمالية لايجاد الكترون ما عند اي نقطة في الشكل (1-9) تتناسب مع مربع سعة الموجه عند تلك النقطة. ولا يعني ذلك ان احتمالية الالكترون تختلف باختلاف الاماكن. ويؤدي حل المعادلة الموجيه الى موجات منتقلة بسرعة ثابتة بحيث ان احتمالية معدل الزمن هي نفسها عند كل نقطة في المادة الصلبة.



الشكل (1-9) طول موجة دبرولي (deBroglie wavelength) للإلكترونات الحرة القليلة الاولى والتي تمتلك اقل طاقة حركية في جسم صلب خطي بطول L .

لقد ذكر في الفصل السابع ان لطول موجة دبرولي (λ) علاقة مع زخم الالكترون (mv) وكالاتي:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

وحيث انه يمكن اهمال معادلة الطاقة النسبية لان سرعة الالكترونات الحرة اقل بكثير من سرعة الضوء لذا يمكن استخدام علاقة الطاقة الحركية (E) التقليدية

وهي: (1-9)

$$E = \frac{1}{2} mv^2$$

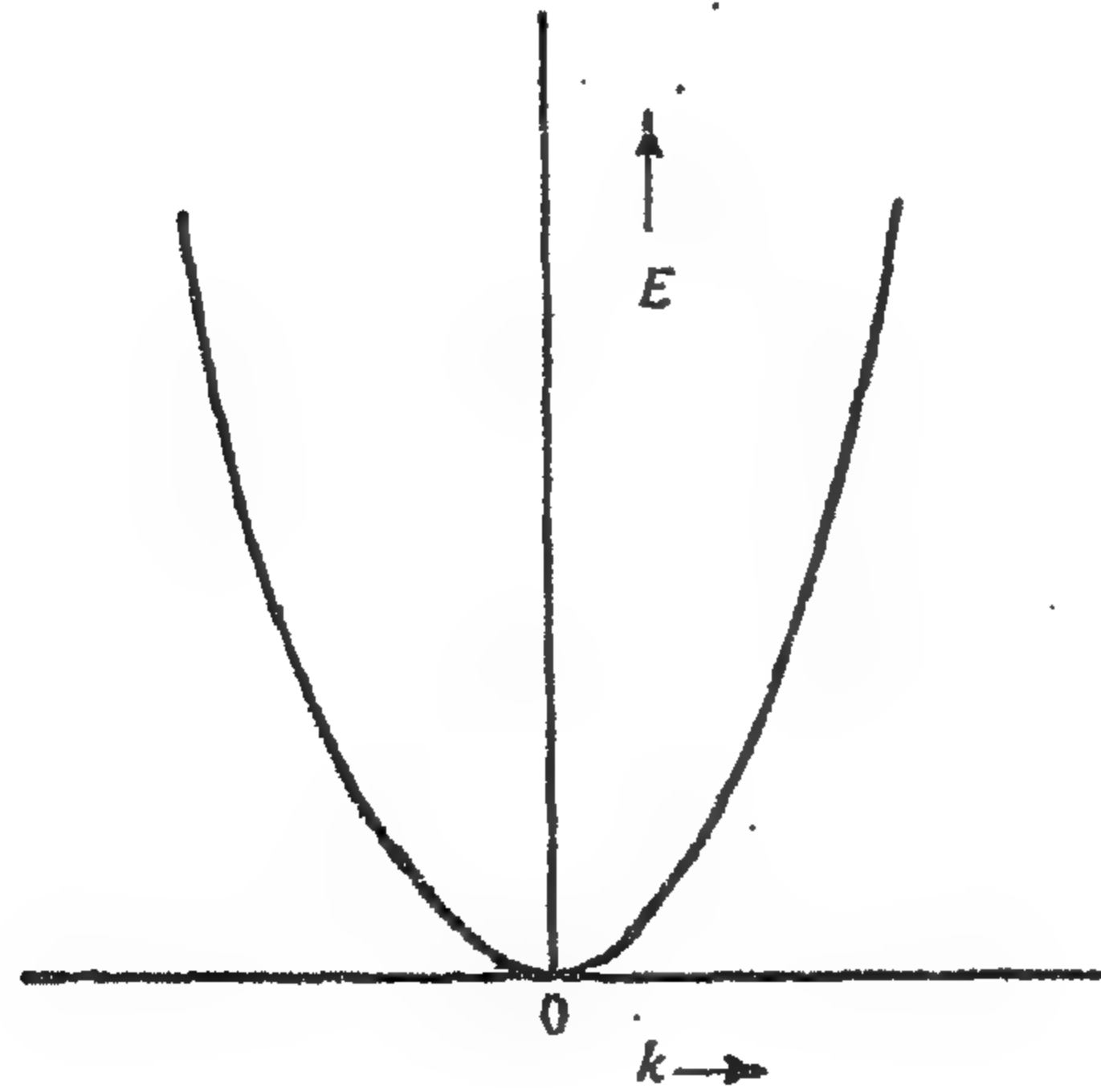
ان لمقدار متجه العدد الموجي (k) علاقة بطول موجة دبرولي وكالآتي:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{..... (2-9)}$$

ومن العلاقات الثلاث اعلاه يمكن التعبير عن الطاقة الحركية للإلكترون بالآتي:

$$E = \frac{h^2 k^2}{8\pi^2 m} \quad \text{..... (3-9)}$$

والعلاقة بين E و k على شكل القطع المكافئ كما في الشكل (2-9).



الشكل (2-9) علاقة القطع المكافئ بين طاقة (E) الالكترون الحر وعدده الموجي k .

تنص قاعدة بولي للاستثناء (Pauli exclusion principle) ان الالكترونين فقط لها برم (spin) متعاكس يمكن ان يحتلا مستوى كمي معين. تنطبق هذه القاعدة على الالكترونات الحرة ايضاً. لذلك كان طول موجة ديبرولي لاول الالكترونين حرين لهما برم متعاكس مساو لضعف طول الجسم (L) الصلب الخطي وينتج عن ذلك ان المستوى الكمي له اقل طاقة حركية ممكنة. وعند هذه الحالة فإن $k = \frac{\pi}{L}$. اما المستوى الكمي الاقرب المسموح به فيمتلك $\lambda = L$ (الشكل 9-1) و $k = \frac{2\pi}{L}$.

وفي حالة الاجسام الصلبة المتعادلة كهربائياً فإن الالكترون الحر الذي له سرعة معينة باتجاه واحد سوف يشترك دائماً مع الكترون آخر له نفس السرعة ولكن باتجاه معاكس. وإلا فسيكون هناك سيل من الالكترونات باتجاه واحد حتى في حالة عدم وجود مجال خارجي مسلط. لذلك يأخذ العدد الموجي كلا القيمتين الموجبة والسالبة . فتكون قيمتا (k) لاول مستويين هي $k = \pm \frac{\pi}{L}$ و $k = \pm \frac{2\pi}{L}$ فيمكن القول انه في المعادلة $k = \pm \frac{n\pi}{L}$ يأخذ العدد الكمي n عند الإزدياد المتعاقب قيم صحيحة بحيث ان الالكترونات الحرة تحتل مستويات كمية طاقاتها متزايدة. وعند التعويض عن قيمة k الاخيرة في المعادلة (9-3) نحصل على :

$$E = \frac{h^2 n^2}{8mL^2} \quad \text{..... (4-9)}$$

تأخذ حركة الالكترون اي اتجاه في الفضاء ، في الجسم الصلب ثلاثي الابعاد لذلك يتم التعبير عن n^2 بما يعادلها في الاتجاهات الثلاثة ($n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$) حيث تؤول معادلة الطاقة الى الآتي :

$$E = \frac{h^2 (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)}{8mL^2} \quad \text{..... (5-9)}$$

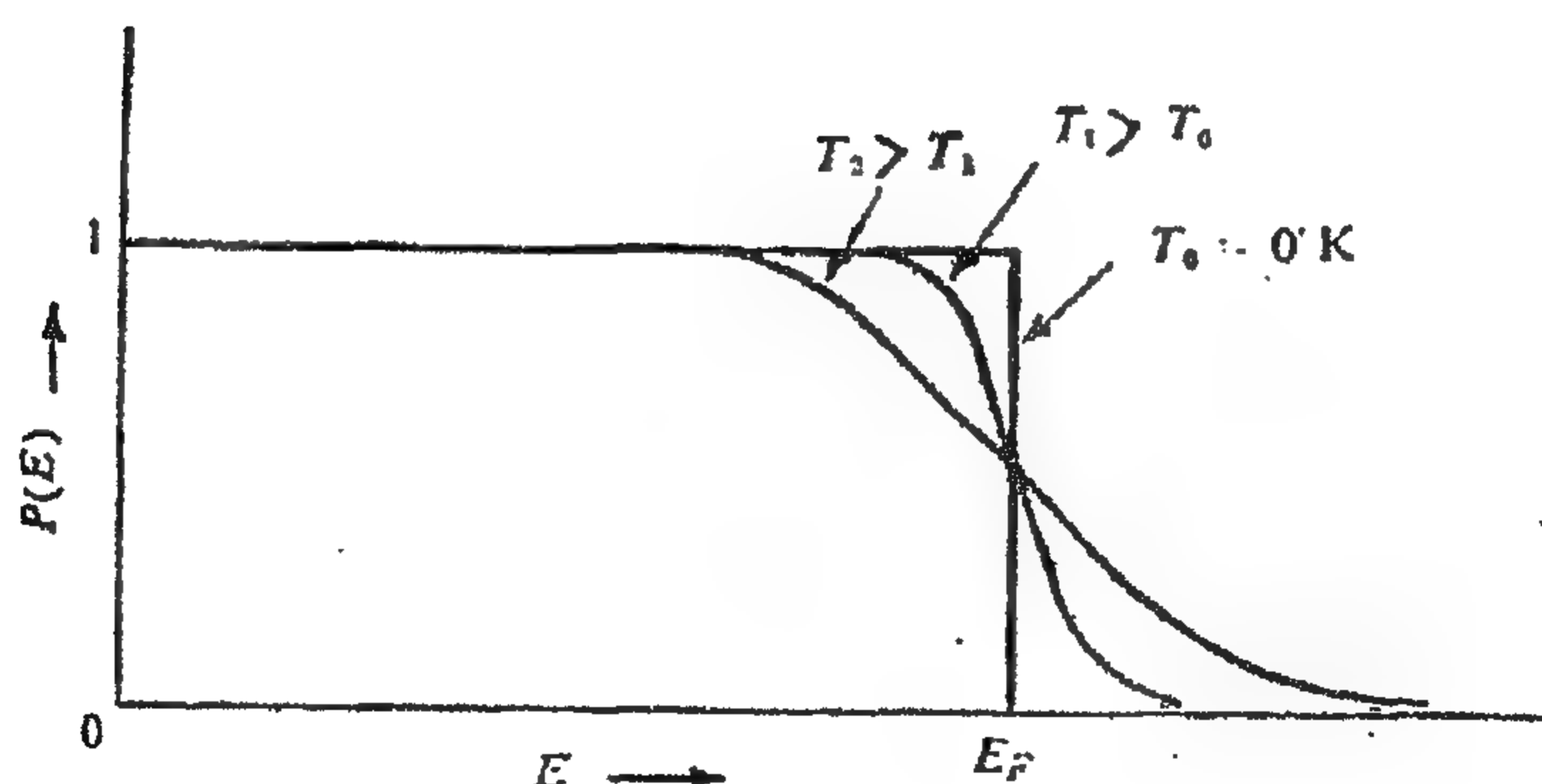
تدعى طاقة اعلى مستوي مملوء عند الصفر المطلق في مخطط E-k (الشكل 9-2) بطاقة فيرمي (Fermi energy) ، E_F . وعند الصفر المطلق تحتل الالكترونات كل المستويات حتى مستوى فيرمي تاركة كل المستويات الاعلى منه خالية . ويكون معدل الطاقة الحركية للإلكترونات تساوي $0.6E_F$.

اما عند درجة حرارة اعلى من من الصفر المطلق ونتيجة للإثارة الحرارية فهناك احتمالية معينة بان تترك بعض الالكترونات مستويات الطاقة الواطئة لتحتل مستويات اعلى من طاقة فيرمي (E_F). لقد اعطيت هذه الاحتمالية بوساطة احصاء فيرمي وديراك والتي تأخذ بالاعتبار التحديدات الكمية الخاصة بقاعدة بولي للإستثناء.

تعطى احتمالية $P(E)$ الالكترون لان يحتل مستوى طاقة ما (E) بالآتي:

$$P(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - E_F)/kT]} \quad \text{.....(6-9)}$$

يمكن استخدام هذه المعادلة لايجاد توزيع الاحتمالية عند الدرجات الحرارية الاعتيادية حيث تكون E_F لاتعتمد تقريباً على درجة الحرارة . يتم رسم هذه الدالة $P(E)$ مع الطاقة E ، كما في الشكل (3-9). وعند درجات حرارية مختلفة لجسم صلب له مستويات كميته اعلى من مستوى طاقة فيرمي، يمكن احتلالها من قبل



الشكل (3-9) توزيع فيرمي-ديراك (Fermi-Dirac) عند درجات حرارية مختلفة.

الالكترونون، حيث يتغير توزيع الالكترونات قرب E_F كدالة لدرجة الحرارة. يتم تعريف مستوى فيرمي عندئذ، بصورة عامة، بأنه مستوى الطاقة الذي له احتمالية 50% في ان يتم احتلاله من قبل الالكترون عند اية درجة حراريه.

٤-٩ التوصيل بواسطة الالكترونات الحرة:

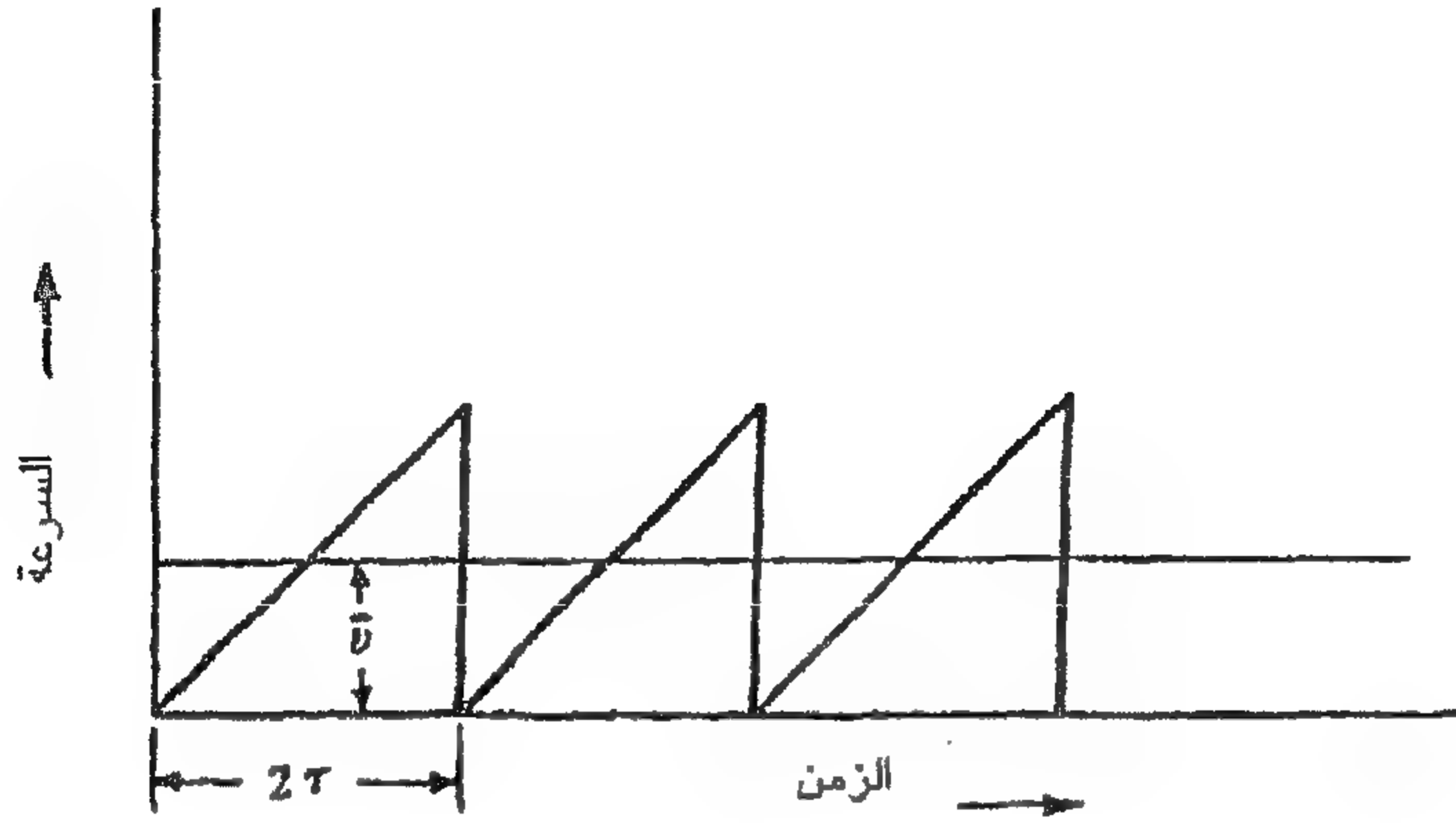
توصل الالكترونات الحرة الكهربائية عندما يتم انحياز توزيع سرعتها المتساوية والمتعاكسة في الجسم الصلب المتعادل بتسليط مجال خارجي ليؤدي الى محصلة سرعة ناتجة باتجاه واحد. يمكن معادلة القوة الناتجة من الكترون شحنته e في مجال سلط له انحدار مقداره ε volt/cm مع القوة المعروفة بالقانون التقليدي.

$$\varepsilon e = ma \quad (7-9) \dots\dots\dots$$

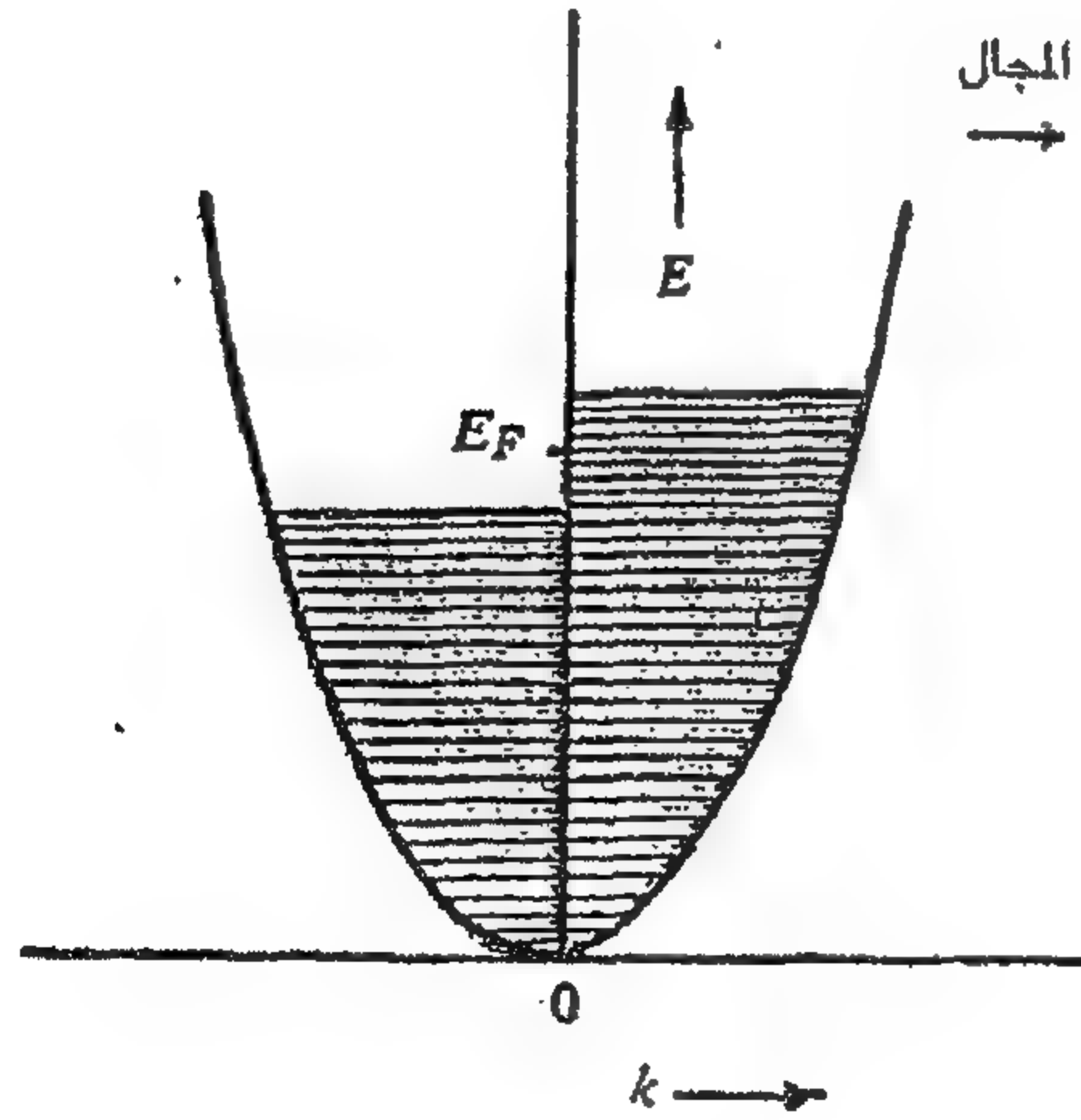
حيث تمثل m كتلة الإلكترون و a التعجيل الناتج من تسليط المجال.

تستمر الالكترونات المعجلة باتجاه المجال بزيادة سرعتها بصورة غير محدوده إنا لم تحدث اصطدامات مع ذرات الشوائب والعيوب البلورية والفوتونات. واعتماداً على الفترة الزمنية بين تصادمين متعاقبين، يكون لها معدل زيادة بالسرعة باتجاه المجال كما في الشكل (9-4) ويفترض ان يفقد الالكترون اثناء التصادم كل سرعته الزائده التي امتلكها قبل التصادم ، وعند ذلك تتحول العلاقة بين E و k الى التوزيع المبين في الشكل (9-5). تكون سرعة اسرع الكترون باتجاه المجال المسلط اكبر مقداراً من سرعة اسرع الكترون بالاتجاه المعاكس اي ضد المجال المسلط. ومثل هذه الإعادة للتوزيع ممكنة فقط عندما تتوفر آنياً مستويات الكترونية فارغة اعلى من مستوى فيرمي. ومن أهم خواص الموصلات هي توفر مثل هذه المستويات على عكس المواد شبه الموصلة والعازلة.

ولو فرض ان معدل زمن التصادم هو 2τ و \bar{v} معدل زيادة السرعة التي حصلت



الشكل (4-9) السرعة الإضافية التي يتم الحصول عليها من قبل الإلكترون بسبب المجال المسلط تُفقد عند الاصطدام بالذرة الشائبة أو العيوب النقطية أو الفونونات.



الشكل (5-9) تحصل الإلكترونات المتحركة باتجاه المجال على سرعة إضافية بينما تخسر الإلكترونات المتحركة بعكس اتجاه المجال بعضاً من سرعتها.

عليها الالكترونات ، فيمكن كتابة المعادلة (9-7) كالآتي :

$$m = \frac{v}{\tau} = \epsilon e \quad \text{..... (8-9)}$$

أو أن

$$\bar{v} = \frac{\epsilon e \tau}{m} \quad \text{..... (9-9)}$$

يمكن اعطاء كثافة التيار أو التدفق J_e الناتج من الالكترونات بالآتي

$$J_e = ne\bar{v} = \frac{ne^2\tau\epsilon}{m} \quad \text{.....(10-9)}$$

n عدد الالكترونات المتحركة و e شحنة الالكترون. ان هذه العلاقة تحاكي صيغة قانون اوم (Ohm's Law). لا تساوي n عدد الالكترونات الحرة في الجسم الصلب لانه تستطيع الالكترونات القريبة من مستوى فيرمي فقط من زيادة طاقتها الحركية بالانتقال الى مستوى كمي أعلى . وتقدر n بحوالي 1% من مجموع الالكترونات الحرة في الجسم الصلب عند درجات الحرارة الاعتيادية.

يتم تعريف الموصلية (σ) بأنها الفيض بوحدة تدرج الجهد، اي ان :

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad \text{.....(11-9)}$$

ان المقاومة الكهربائية (ρ) هي معكوس الموصلية σ اي ان :

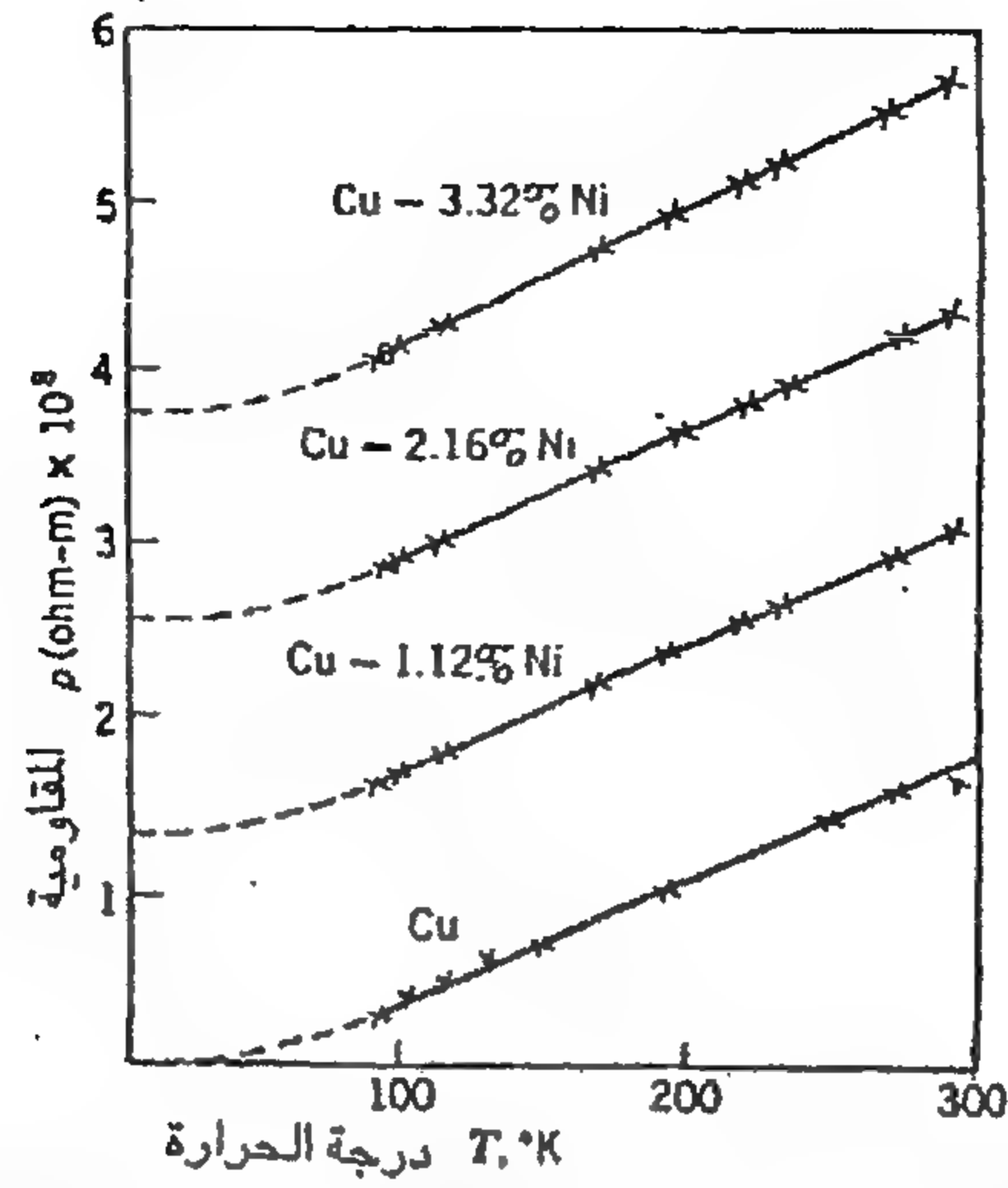
$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad \text{..... (12-9)}$$

٥-٩ عمليات التصادم:

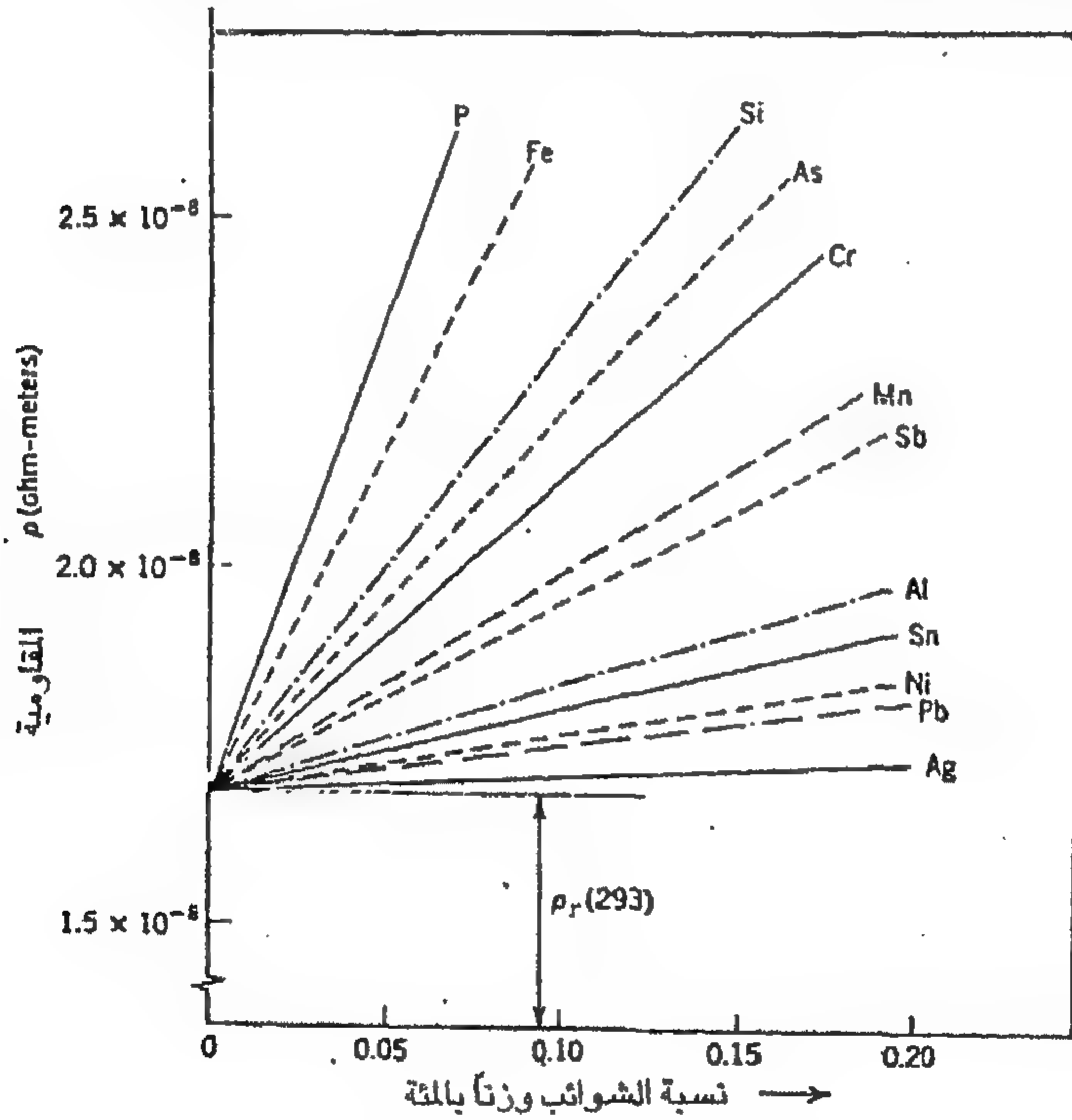
يعرف معدل المسار الحر "l" (mean free path) للإلكترون بأنه معدل المسافة التي يقطعها الإلكترون بين تصادمين متعاقبين . يساوي معدل المسار الحر في البلورة المثالية الخالية من الشوائب والعيوب مالا نهاية عند الصفر المطلق، ومعنى ذلك انه لا يوجد اي تصادم وان الموصلية الكهربائية تساوي اللانهاية . تعتبر الذرات المذابة مراكز استطارة للإلكترونات . فدخل هذه الذرات الى الشبيكة البلورية يؤدي الى التصادمات ومن ثم انخفاض معدل المسار الحر والموصلية . وبالتشابه يزيد وجود الخلل النقطي والانخلاعات والحدود البلورية من استطارة الإلكترونات ويقلل الموصلية . ان الخلل النقطي (point defects) (ومن ضمنها الذرات المذابة) هي مركز استطارة أكثر فعالية من أنواع الخلل الأخرى.

يستطيع الفونون (هو كم من الطاقة المرنة او الاهتزاز في النسق البلوري) الإلكترونات أيضاً . يؤثر او يشوش اهتزاز الذرات العشوائي حول معدل اماكنها في البلورة التكرار المثالي فيها ويتداخل مع حركة الإلكترونات وقد وجد أن زمن التصادم عند درجات الحرارة الواطئة يتناسب مع مكعب مقلوب درجة الحرارة المطلقة . اما عند درجات الحرارة العالية، اعلى من درجة حرارة دبي "Debye"، فإن زمن التصادم يتناسب مع مقلوب درجة الحرارة المطلقة . يبين الشكل (6-9) تغير المقاومة الكهربائية (p) مع درجة الحرارة للنحاس النقي الحاوي على قليل من الخلل في الشبكة البلورية . ويظهر ان التغير تكعيبي عند الدرجات الحرارية الواطئة وخطي عند الدرجات العالية . تزداد المقاومة عند اضافة النيكل الى النحاس كذرات مذابة في الشبكة البلورية . للنحاس . تتناسب الزيادة في المقاومة مع تركيز الذرات المذابة، ضمن مدى التراكيز القليله، بصورة خطيه . يختلف تأثير العناصر المذابة على مقدار مقاومة معدن معين . يبين الشكل (7-9) تأثير عدد من العناصر المذابة في النحاس وبتراكيز مختلفة وقليلة نسبياً وعند درجة حرارة الغرفة .

* هي الدرجة الحرارية التي فوقها لا تعتمد السعة الحرارية عند الحجم الثابت (CV) على درجة الحرارة، وتكون قيمتها اقل من درجة حرارة الغرفة للعديد من المواد الصلبة .



الشكل (6-9) المقاومة الكهربائية لسبائك Cu-Ni إضافة إلى النحاس النقي كدالة لدرجات الحرارة.



الشكل (7-9) تأثير إضافة كميات قليلة من عناصر مختلفة على المقاومة الكهربائية (ρ) للنحاس عند درجة حرارة الغرفة.

وحيث ان المقاومة المتخلفة " ρ_T " او المتبقية (residual resistivity) تتولد نتيجة لاستطارة الالكترونون من قبل الشوائب والخلل في النسق البلوري، فإنها تتأثر اذن بتغيير توزيع الذرات المذابة اضافة الى تركيزها. وهي تتأثر ايضاً بالتشويه على البارد والاحماد (quenching) او التشعيع النيوتروني (neutron irradiation). تؤدي كل هذه العمليات الى ابدال مقدار اكبر من الفراغات (vacancies) والانخلاعات (dislocations) او الذرات البينية (interstitial atoms) الى الشبكة البلورية. يمكن ان تخفض المعاملات الحرارية المقاومة لانها تقلل او تغير توزيع مجموع الخلل البلوري. ولذلك تستخدم تقنية المقاومة عادة لتعيين معدل و مقدار التغيير في البنية الناتج من العمليات الحرارية او الميكانيكية للمعدن.

لقد سبق التكلم في الفصل الثاني عن علاقة مقاومة المعدن بدرجة الحرارة. ففي المعادن النقية والسبائك المنخفضة التراكيز يكون مجموع المقاومة (تناسب المقاومة مباشرة مع المقاومة لمعدن ما عند ثبوت الظروف) هو حاصل جمع حدين اولهما المركبة الحرارية للمقاومية ρ_L والتي تنشأ من اهتزازات الشبكة البلورية وثانيهما ρ_T المقاومة المتخلفة، والتي تنشأ من وجود الذرات المذابة والخلل في البنية البلورية.

يبين الشكل (6-9) ايضاً تغير المقاومة مع درجة الحرارة لثلاث سبائك تحتوي على 1.12% و 2.16% و 3.32% من النيكل. يؤدي اتصال منحنيات المقاومة للسبائك الى الصفر المطلق الى الحصول على المقاومة المتخلفة (ρ_T) والتي تعزى ، كما ذكر، الى وجود الذرات المذابة فقط اذا افترضنا قلة او عدم وجود العيوب في الشبكة البلورية او خلل الشبكة من الحدود البلورية، وهذا يلغي دور استطارة الفونون (phonons) للإلكترونات. تصف قاعدة اضافة المقاومة لما تيسن (Mat-thiessen's rule) السلوك اعلاه ويمكن كتابتها بالآتي:

$$\rho_M = \rho_L + \rho_T \quad \text{..... (13-9)}$$

وأن:

$$\rho_{\tau} = \rho_D + \rho_s \quad \dots\dots\dots (14-9)$$

اذن:

$$\rho_M = \rho_L + \rho_D + \rho_s \quad \dots\dots\dots (15-9)$$

حيث تمثل :

ρ_M مقاومة المعدن الكلية

ρ_L مركبة المقاومة (معامل الاستطارة) المعتمدة على درجة الحرارة وتسمى مقاومة الشبكة البلورية (Lattice resistivity).

ρ_D مركبة المقاومة (معامل الاستطارة) الناتجة من العيوب الموجودة في الشبكة البلورية اضافة الى الحدود البلورية.

ρ_s مركبة المقاومة (معامل الاستطارة) الناتجة من وجود الذرات المذابة. ويفترض ان لا تعتمد ρ_D و ρ_s على درجة الحرارة.

٦-٩ بعض تطبيقات المقاومة الكهربائية:

ان التطبيقات التي لها علاقة بالمقاومة الكهربائية او المقاومة كثيرة كخطوط نقل القدرة الكهربائية العالية التي تتطلب مقاومة واطئة جداً ومقاومة ميكانيكية عالية. ومواد التماس او الربط الكهربائي التي تتطلب الى جانب الموصلية الكهربائية العالية، نقطة انصهار عالية ومقاومة عالية للتأكسد اضافة الى موصلية حرارية عالية ايضاً. والمقاومات العيارية التي لا تتغير قيمها بتغير درجة حرارة الجو اي ان لها معامل حراره للمقاومة واطء جداً. لقد تم، في السنوات الاخيرة، صنع مقاومات الاغشية الرقيقة. والتي لها خواص مقاومة تختلف عن جرم المادة المصنوعة منها وذلك لأن معدل المسار الحر هو بحدود سمك الغشاء الرقيق . وعناصر التسخين كما في افران المقاومة الكهربائية وغيرها والتي تتطلب نقطة انصهار عالية ومقاومة جيدة للتأكسد. ومحارير المقاومة الكهربائية ، وقد تمت الاشارة اليها في الفصل

الثاني، والتي تتطلب معامل حراره للمقاومة عالي لاجل الحساسية العالية لدرجات الحرارة، كما في حالة معدن البلاتين النقي.

إلا أن التطبيقات الأكثر أهمية في حقل هندسة المعادن والمعاملات الحرارية، هو أنه يمكن متابعة الترسيب في حالة التصليد بالترسيب (precipitation hardening) وقياس الكسر الحجمي (volume fraction) للترسبات بتقنية قياس المقاومة الكهربائية في كل حالة من الحالات وعند درجة حرارة منخفضة (على سبيل المثال درجة غليان النيتروجين المسال 77K او حتى درجة غليان الهيليوم المسال 4.2K في بعض الأحيان) وذلك لتقليل وتثبيت P_L في حالة عمل نموذج ملائم لذلك. ومن المعلوم ان قياس الكسر الحجمي يتطلب اجراء القياسات على عدة صور للنموذج مأخوذة اما بالمجهر الضوئي. وهذا نادر، او بالمجهر الالكتروني النافذ ولا يخفى ما في ذلك من صعوبة مصاحبة لهذه العملية، عند تحضير العينات وخصوصاً عند استخدام المجهر النافذ. ولذلك كانت متابعة عملية الترسيب وقياس الكسر الحجمي بطريقة المقاومة اسهل بكثير وتتم على اساس قاعدة ماتيسن اي انه كلما كان مقدار الترسيب اكبر (اي كلما خرجت كمية اكبر من الذرات المذابة خارج المحلول الجامد) كلما قلت المقاومة وبعد اجراء المعايرة يمكن استخراج الكسر الحجمي عند اي حاله من الحالات والى درجة جيدة من الدقه.

٧-٩ مقاييس الانفعال الكهربائية Electric Strain Gauges :

وهي احدى تطبيقات المقاومة الكهربائية، لكنه نظراً لأهميتها في الفحص افراد لها بند خاص.

ولو فرض ان المقاومة مقدار ثابت لكل مادة عند الظروف المعينه فإن مقاومة اي سلك من اية سبيكة دالة لطوله ومقطعة العرضي وكالاتي:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{..... (16-9)}$$

حيث يمثل R مقاومة السلك و L طوله و A مساحة مقطعه العرضي .

يتبين من ذلك أنه إذا ازداد الطول أو قلت مساحة مقطعه فإن مقاومته تزداد.

تعتمد نظرية مقاييس الانفعال الكهربائي بالتعبير عن الإزاحة بدلالة التغيير في المقاومة الناتج عنها ومن ثم تقدير القوى الخارجية التي يتعرض لها الجسم . فقد لوحظ تغير مقاومة الموصلات المعدنية بصورة خطية مع التشويه الحاصل فيها. لقد تم تطوير مقاييس الانفعال في السنوات الأخيرة، وبالرغم من صغر مساحة مقاييس الانفعال التي لا تتجاوز سنتيمترات مربعة قليلة فإنها تجد مجالات واسعة لقياس أي نوع من أنواع الانفعال بدءاً من الانفعال المستقر (الستاتيكي) وانتهاء بالانفعال بذبذبات تتجاوز العشرات. إن المقادير الفيزيائية كالإزاحة والاجهاد والضغط والتحميل والعزم .. يمكن أن تقاس بها حيث تتحول هذه الكميات إلى مقادير كهربائية يمكن من ثم قياسها بسهولة.

يشمل مجال استخدام مقاييس الانفعال السفن والطائرات والمكائن والهندسة المدنية والانشاءات ووسائط النقل وغيرها.

يمكن أن تكون مقاييس الانفعال بهيئة سلك دقيق أو رقائق معدنية أو مواد شبه موصلة ، ومهما كان نوع سلك الانفعال فلا بد أن تتوفر فيه الشروط التالية :

- ١- تكون حساسيته باتجاه التغيير النسبي في المقاومة أكبر ما يمكن.
- ٢- أن تكون المقاومة الكلية لمقياس الانفعال أصغر ما يمكن.
- ٣- أن يكون معامل تمدده الحراري صغير لكي تنخفض الانحرافات إلى أقل ما يمكن.
- ٤- ينبغي أن لا يظهر التأثير الكهربائي الحراري في مناطق الاتصال مع المصدر.
- ٥- أن تبدي المادة المصنوع منها المقياس علاقة خطية بين تغير الانفعال والمقاومة.

ان أفضل السبائك المستخدمة في هذا المجال هي سبيكة الاديافانس والتي تتكون من معدني النيكل والنحاس واهم ميزاتها هي العلاقة الخطية بين التشويه النسبي وتغير المقاومة وكذلك معامل التمدد الحراري القليل.

ان أساس المقياس هو سلك دقيق يتراوح قطره بين $20-30\mu m$ بشكل مشبك ملصوق على قاعده عازله كما في الشكل (8-9) حيث يتم لصق مقياس الانفعال هذا على الجزء المراد فحصه. وعند تعرض الجزء الى التشويه ينتقل ذلك بدوره الى سلك مقياس الانفعال في حالتي الشد والانضغاط حيث يؤدي الاجهاد عند الشد الى زيادة طوله قليلاً بينما يؤدي الانضغاط الى عكس ذلك. يتم قياس التغير الخاصل في مقاومة السلك بوساطة اجهزة الكترونية خاصة تكون معايرتها متناسبة مع مقدار التغير في الطول $\frac{\Delta L}{L}$. يمكن استخدام مقياس الانفعال في الاجزاء ذات الأشكال غير المنتظمة نظراً لصغر مساحتها وخفة وزنها .



الشكل (8-9) صورة تخطيطية لاحد مقاييس الانفعال.

ان العلاقة بين $\frac{\Delta R}{R}$ و $\frac{\Delta L}{L}$ هي علاقة خطيه في معظم المواد المستخدمة . يمكن استخدام مقاييس الانفعال لقياس التغير النسبي في الطول $\frac{\Delta L}{L}$ من

حوالي 1×10^{-6} لغاية 4×10^{-2} .

تنتشر حالياً مقاييس انفعال مصنوعة من رقاقة معدنية (سمكها بحدود $10 \mu m$) بدلاً من السلك الدائري المقطع. ونظراً لأن المساحة السطحية للموصل المستطيل المقطع هي أكبر من المساحة السطحية للسلك الدائري عند تساوي مساحة مقطعيهما فإن عدداً من مواصفات مقياس الانفعال المصنوع من رقاقة معدنية أفضل من نظيراتها السلكية وتتميز في قابليتها على أشعاع الحرارة المتولدة مما يساعد على زيادة التحميل واستخدام تيار أعلى مما يزيد من حساسية المقياس إضافة إلى تحقيق تماس أفضل بين سطح الموصل وبين العازل الورقي الخاص المثبت عليه.

ان العلاقة بين التشويه النسبي وتغير المقاومة كالتالي:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (17-9) \dots\dots\dots$$

ε الانفعال او التشويه النسبي

K ثابت مقياس الانفعال وقيمته تتراوح بين 1.5 الى 2.5, $\frac{\Delta R}{R}$ التغير النسبي في المقاومة.

كما أنه ضمن حدود المرونة فإن.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (18-9) \dots\dots\dots$$

σ هو الاجهاد و E معامل المرونة .

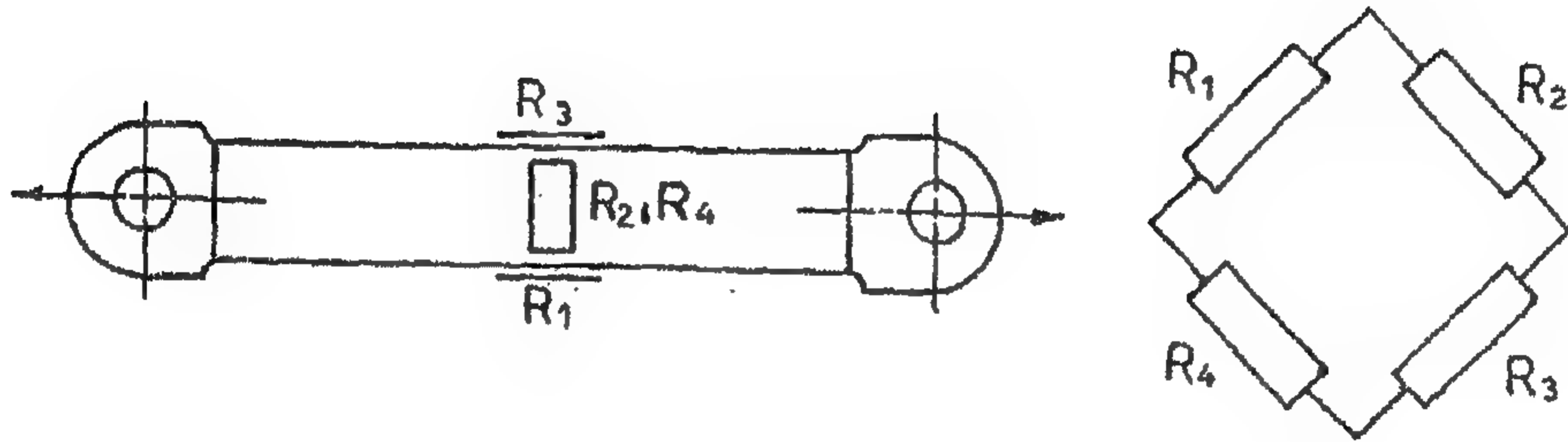
ومن المعادلتين (17-9) و (18-9) يمكن حساب الاجهاد وكالتالي:

$$\sigma = \frac{E}{K} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (19-9) \dots\dots\dots$$

بعض الامثلة في استخدام هذه المقاييس:

لقد ذكر ان مقاييس الانفعال تستخدم بصورة واسعة لقياس القوى والعزوم والضغط والازاحة والانفعالات وغيرها من المقادير الفيزيائية الاخرى. وفي كل الحالات يتم تحويل التأثيرات الميكانيكية المسببة للإنفعال في الجزء المرن الى اشارات كهربائية بوساطة مقياس الانفعال الملصق على الجزء.

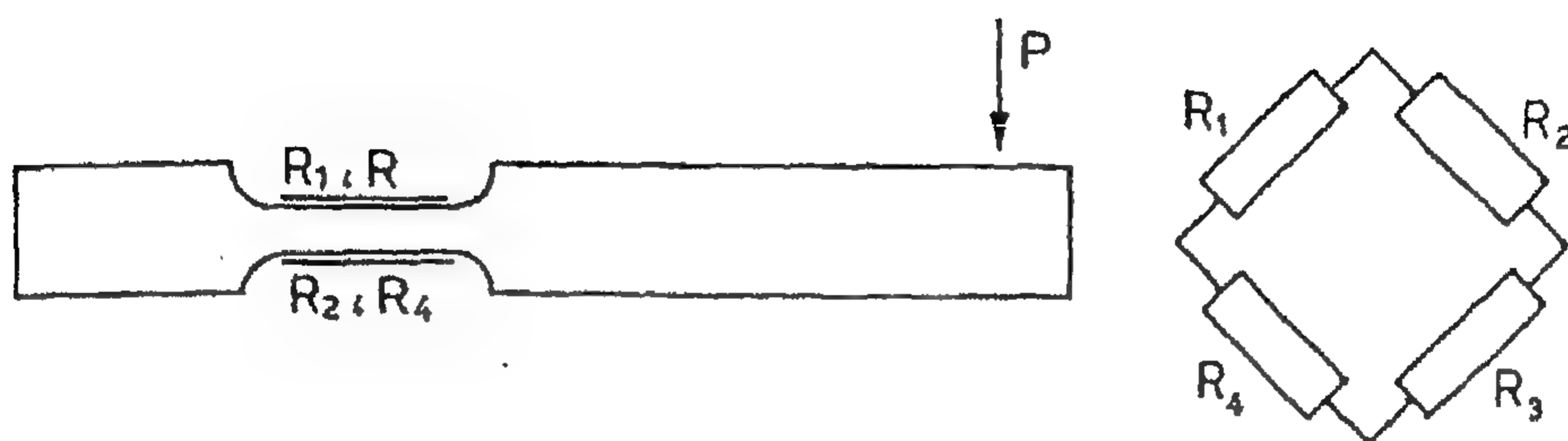
فلقياس قوة الشد، الشكل (9-9) ، يتم لصق مقياسي الانفعال R_1 و R_3 بموازاة المحور ويعتبران العنصران الرئيسيان في الجهاز المبين في الشكل (9-9) . اما المقياسان R_2 و R_4 فيلصقان باتجاه عمودي على المحور لأجل التعويض الحراري. ونظراً لكون مقياسي الانفعال R_1 و R_3 ملصقان على جهتين متقابلتين من المحور ومرتبطان كهربائياً الى فرعين متقابلين من قنطرة وتستون الكهربائية ، فلن يظهر التأثير الآني للثني الذي قد يحصل وبذلك تظهر قوة الشد فقط. تتم ملاحظة مقطع المحور بحيث لا يصل الانفعال الاقصى الى حد المرونة. كما وينبغي اختيار مادة المحور بحيث يكون التأثير الحراري على المرونة اقل مايمكن.



الشكل (9-9) منظومة مقاييس انفعال لقياس قوة الشد.

اما استخدام مقياس الانفعال لقياس قوة الحني ، على سبيل المثال، الشكل (9-10) فإن الاجزاء المرنة المحملة باتجاه محورها الطولي لا تكون ملائمة لقياس القوة

الصغيرة بصوره خاصة . ولغرض الحصول على حساسية ملائمة، نسبة الى الأجزاء المستخدمة الاخرى فمن الضروري استخدام مقطع عرضي صغير نسبياً والذي يعتبر اكثر ملائمة لقياس الاجزاء المعرضة للإجهاد بالحنى.



الشكل (9-10) منظومة مقاييس انفعال لقياس قوة الحنى.

تلتصق مقاييس الانفعال في الجهاز (الجزء) المبين في الشكل (9-10) بحيث يكون فيه كل من R_1 و R_3 لقياس الشد بينما يكون كل من المقياسين R_2 و R_4 لقياس الانضغاط . يؤدي جمع اشارات مقاييس الانفعال المنفرده الى حساسية قياس مضاعفة بأربعة اضعاف والى تعويض حراري كامل.

وهكذا يمكن استخدام مقاييس الانفعال لقياس بقية الكميات الميكانيكية آنفة الذكر.

٨-٩ قياس عمق الشق (Crack depth measurement) :

ان من خواص التيار المتناوب (alternating current) انه إذا مرّ في جسم موصل فإنه يمر عبر الطبقات السطحية للجسم. وكلما زاد تردد (frequency) التيار فإنه يقترب من السطح أكثر فأكثر. ويمكن قياس فرق الجهد (Potential difference) او

الفولتية (voltage) بين اي نقطتين على السطح أثناء مرور التيار الكهربائي بوساطة قطبين يوضعان على النقطتين المراد قياس فرق الجهد بينهما. فإذا كانت المسافة بين القطبين ثابتة، فستكون الفولتية عندئذٍ متساوية إذا كانت الطبقات السطحية للمادة متجانسة وخالية من العيوب.

أما عند وجود شق (crack)، على سبيل المثال، فإن التيار يجب أن يمر عبر مسافة أطول، أي بمحاذاة الشق، ليصل إلى القطب الثاني ويكمل الدائرة الكهربائية. وهذا يعني أن التيار سيعاني مقاومة أكثر عند مروره عبر الطريق الأطول، لأن المقاومة تتناسب طردياً مع طول مسار التيار في المادة الواحدة عند ثبوت المقطع العرضي لها (المعادلة 9-16). فإذا وضع القطبان الخاصان بقياس الفولتية عبر طرفي الشق فإن الفولتية المسجلة ستكون أكبر وذلك حسب قانون أوم (Ohm's Law) في الكهربائية وهو:

$$V = i R \quad \text{..... (20-9)}$$

حيث تمثل :

- i مقدار التيار (ثابت في هذه الحالة) (أمبير) .
- V مقدار فرق الجهد أو الفولتية (الفولت) .
- R المقاومة الكهربائية (أوم) .

ومن هنا يتبين أنه كلما زاد عمق الشق زاد فرق الجهد (V) وبصوره طردية.

فإذا تم عمل معايره بين مقدار الفولتية واعماق الشقوق القياسية (standard cracks) الموجوده في القطعة المعدنية الخاصة بالمعايره امكن عندئذ قياس عمق اي شق موجود في القطعة المراد قياس عمق الشق فيها. ومن الجدير بالذكر ان مقاومة (Resistivity) المادة المراد قياس عمق الشق فيها ومقاومية قطعة المعايره يجب ان تكون متساوية وإلا كانت النتائج غير مضبوطة.

لقد تم تصميم مجس خاص لهذا الغرض مع الدوائر الكهربائية اللازمة لتنفيذ ذلك كما في الشكل (9-11) .

اما في حالة كون الشق مائلاً (ليس باتجاه عمودي على السطح) كما في الشكل (9-12) حيث تكون.

$$T = L \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (9-21)$$

حيث تمثل:

T البعد العمودي بين نهاية الشق والسطح.

L طول الشق .

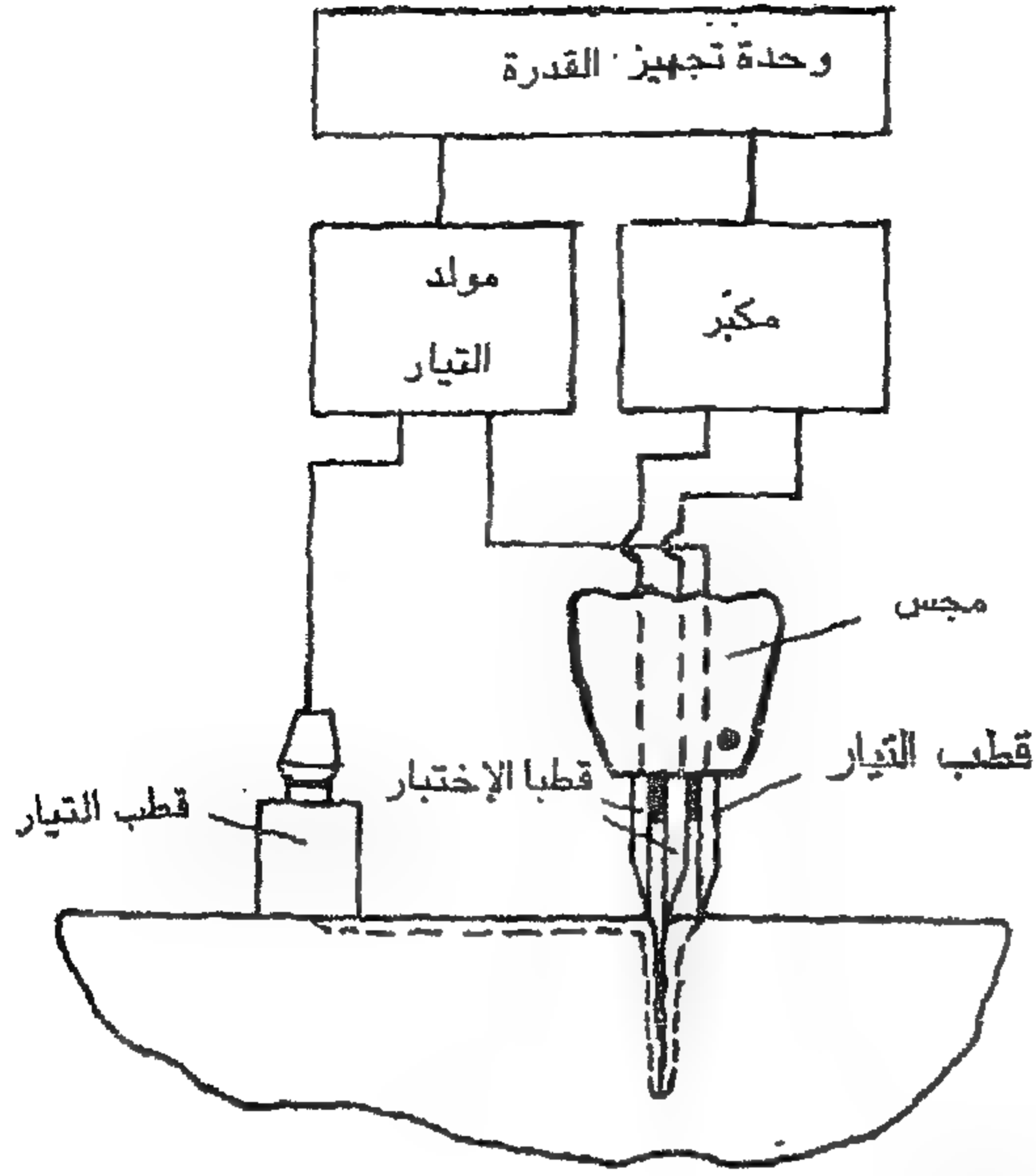
α زاوية الميل بين العمود على السطح والشق.

فيلزم اعادة الفحص مرة ثانية ولكن بعد عكس الاقطاب (أي بتدويرها بزاوية 180°) ثم أخذ القراءه ثانية. فإذا كانت القراءتان غير متساويتان دل ذلك على ان اتجاه الشق يميل بزاوية (غير 90°) عن السطح (الشكل 9-13) . وفي الحالة الاخيرة اذا فرض ان مقدار القراءة الاولى A ومقدار القراءة الثانية، بعد عكس الاقطاب ، هو B فقد لوحظ علاقة تجريبية تربط بين A و B و T هي:

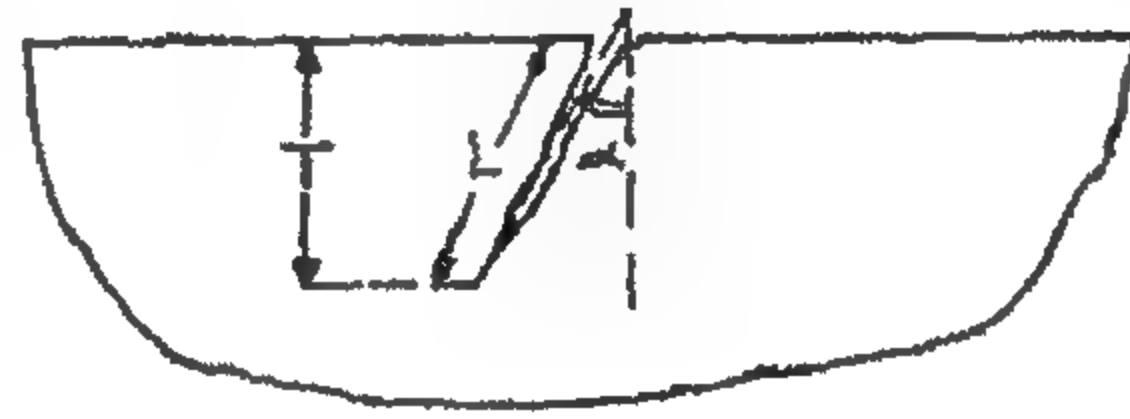
$$T \approx \frac{B^2}{A} \quad \dots\dots\dots (9-22)$$

ويمكن تفسير اختلاف القراءتين في حالة الشق المائل بسبب اختلاف طول مساري التيار المتناوب في الحالتين كما في الشكل (9-13) . أما سبب الاختلاف في طول المسارين فهو ان التيار المتناوب عالي التردد يميل الى المرور قرب السطح، كما تم ذكره، أما الخاصية المعاكسة فهو انه يميل الى المرور في الطريق الاقصر وذلك لصغر مقاومته. اذن هناك سببان متعاكسان وفي النتيجة ان التيار سيمر في الحالة الثانية بطريق وسط (S_2) أقصر من الطريق الأول (S_1) وبما أن $S_1 > S_2$

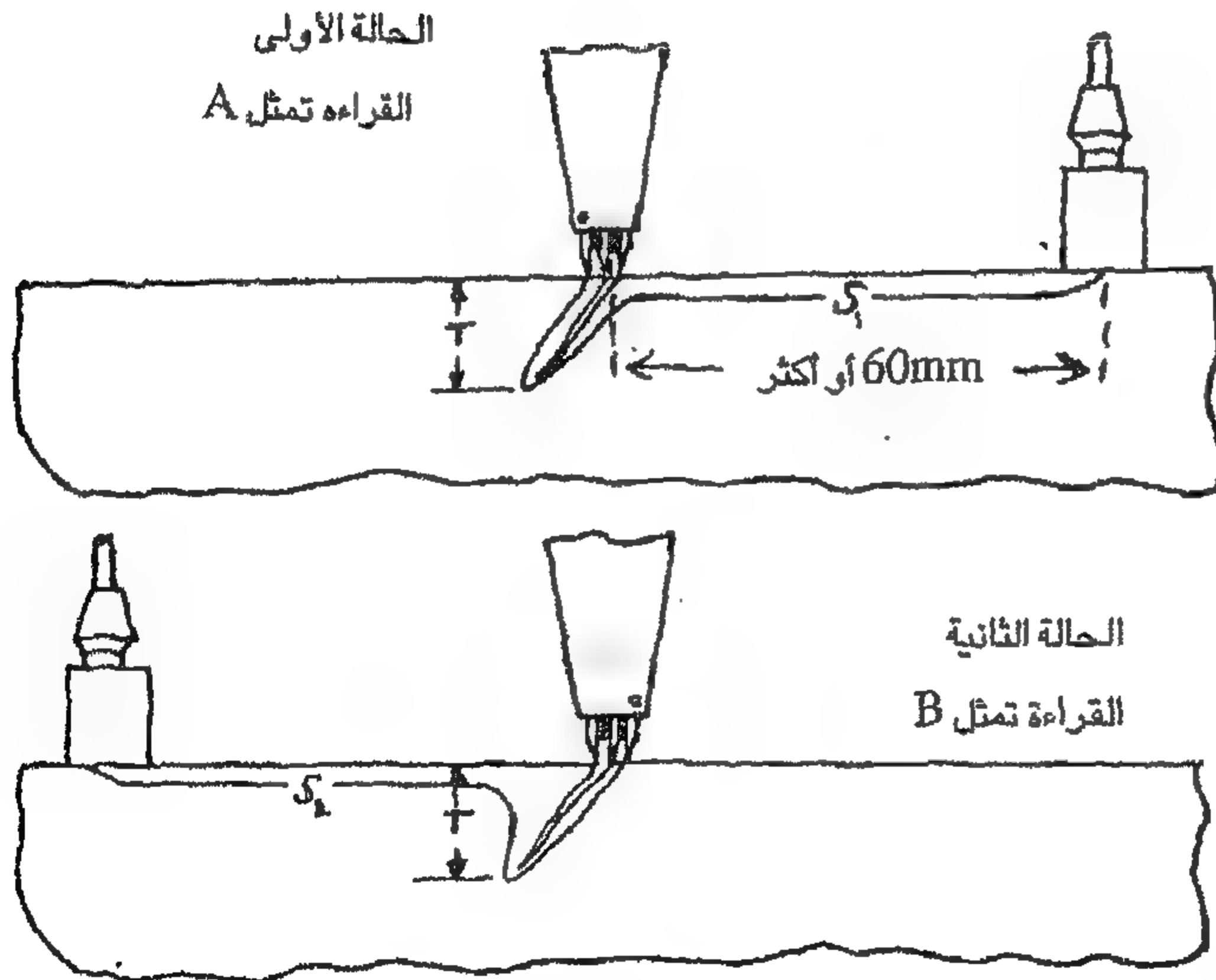
فستكون: $A > B$



الشكل (9-11) رسم
تخطيطي يوضح مبدأ
قياس عمق الشق
العمودي مع الأجهزة
اللازمة لذلك.



الشكل (9-12)
يوضح الشق المائل
بزاوية α مع العمود.



الشكل (9-13) حالتا
القياس في الشق المائل
والفرق في طول مساري
التيار.

$$T \approx \frac{B^2}{A} \text{ لأن } S_1 > S_2 \text{ فتكون } A > B$$

العوامل التي تؤثر علي دقة القياس:

Factors affecting precision of Measurement

- ١- تنظيف سطح القطعة المراد اختبارها.
- ٢- ان تكون اقطاب المجس مدببه قدر الامكان.
- ٣- معايرة الجهاز باستخدام قطعة معايره من نفس المادة المراد فحصها.
- ٤- تؤثر حواف (edges) القطعة على القراءات إذا كانت الشقوق مائله باتجاه الحافة وقريبة منها.
- ٥- اذا اريدت المقارنة بين شق ذو عمق كبير يصل الى قرب نهاية السطح الثاني للقطعة المراد فحصها وبين شق ذو عمق صغير فسيحصل حيود في القراءة نحو القيمة الاكبر في حالة الشق الكبير.
- ٦- يجب ان تكون المسافة بين قطب التيار الثاني (المنفرد) والمجس الثلاثي او الشق المراد قياس عمقه لا تقل عن 60mm، كما في الشكل (9-13) على سبيل المثال، كما يجب ان يكون قطبي التيار على طرفي الشق (اي كل على جهة منه).

تمارين الفصل التاسع

- ١- ما المقصود بالمقاومة الكهربائية والمقاومية.
- ٢- على أي أساس تتدرج المواد في مقاوميتها ، وإلى كم مجموعة يمكن تقسيم مقاومية المواد.
- ٣- اشرح كيف تؤثر الذرات المذابة والعيوب الذرية الأخرى على المقاومية.
- ٤- تكلم عن أهم تطبيقات المقاومة الكهربائية في فحص المواد.
- ٥- ماهي ميزات طريقة المقاومية في متابعة الترسيب وقياس الكسر الحجمي على الطرائق التقليدية في القياس (طرائق المجهر سواءً الضوئي أو الإلكتروني).
- ٦- ماهي أهم العوامل التي تؤثر على قيمة المقاومية للمادة مع ذكر أمثلة على ذلك .
- ٧- ماذا تعرف عن مقاييس الانفعال وماهي أهم وظائفها.
- ٨- ماهي الشروط الواجب توافرها في سلك مادة مقياس الانفعال.
- ٩- أثبت ان الاحتمالية في ان يحتل الكترون ما مستوى طاقة E هي (أ) قليلة جداً إذا كانت $E \gg E_F$ ، (ب) 0.5 إذا كانت $E = E_F$ و (ج) حوالي واحد إذا كانت $E \ll E_F$
- ١٠- احسب زمن تصادم استطارة الإلكترون في الفضة إذا كانت مقاوميتها عند درجة حرارة الغرفة هي $1.6 \times 10^{-8} \Omega m$.

الفصل العاشر

الفحوص الميكانيكية Mechanical Testing

١٠-١ المقدمة:

لا بد ان تمتلك المادة خواصاً مناسبة لكي تكون ذات قيمة عند المهندس وخصوصاً الخواص الميكانيكية. وتشتمل الخواص الميكانيكية على الصلادة (hardness) والمقاومة (Strength) والمتانة (toughness) والزحف (creep) والكلال (fatigue) والثني (bending) والتقيب (Cupping) واللي (torsion). وتتباين قيم هذه الخواص بشكل كبير من مادة الى أخرى اعتماداً على بنية المادة وتكوينها الكيميائي. وسيتم التركيز في هذا الفصل على المواد المعدنية نظراً لأهميتها من بين المواد الهندسية في الصناعة.

١٠-٢ الصلادة واختبار الصلادة Hardness and Hardness Test

ماهي الصلادة:

ربما تكون الصلادة هي الخاصية الأهم للمعادن. ومن الصعوبة تعريفها تعريفاً دقيقاً ولكن يمكن ان تعرف والى مدى جيد، بأنها قياس لمقاومة التشكيل (a measure of resistance to deformation) أو أنها قياس لمقاومة التغلغل (Penetration). ان كلا التعريفين يشيران الى مقاومة سطح المعدن او المادة للضرر او الانبعاج او التمزق او التدهور بأي شكل من الأشكال نتيجة لقوة او ضغط يسلط عليه.

لذلك ومن أجل ابتداء وسيلة لقياس الصلادة ، يجب ان تصنع ماكينة (جهاز) فيه باعج (Penetrator) والذي يحاول ان يبعج او يتغلغل او يخدش السطح. يجب ان

استخدام قوة أو حمل يسلط على الباعج . ومن ثم فإن مقياس أو حجم (size) الاثر الناتج على سطح النموذج سيكون مقياساً لصلادة المادة.

العلاقة بين الصلادة وبقية الخواص:

ان خاصية الصلادة مهمة في حقل هندسة المواد لأنها ترتبط بعدة خواص للمادة الهندسية وخاصة المقاومة (strength) والهشاشية (brittleness) والمطيلية (ductility) فبواسطة الصلادة يمكن بصورة غير مباشرة قياس المقاومة و الهشاشيه والمطيليه للمادة المعدنية.

فالصلادة اذن تشبه قائمة مشتريات البقاله للعائلة . فمن حجم القائمة يمكنك تقدير حجم العائلة. ومن نوعية مواد القائمة يمكن تخمين المستوى الاقتصادي للعائلة وعاداتها الاجتماعية. وبالمثل فإن الصلادة تعكس العديد من خواص وسمات عائلة المادة. كالمقاومة والهشاشية والمطيلية وقابلية التشغيل (machin-ability) وقابلية التشكيل (formability) والمتانة (toughness) والميل للتشقق (cracking tendency).

طرائق قياس الصلادة:

هناك العديد من طرائق قياس الصلادة والعديد من أجهزة قياس الصلادة . كل طريقة لها مميزات ومثالبها نسبة للطرائق الاخرى. اذن فتحديد طريقة الفحص والجهاز الذي يجب ان يشتري يعتمد على التطبيق المحدد.

ادناه اهم طرائق اختبار الصلادة:

١- صلادة برنيل Brinell hardness

٢- صلادة فيكرز Vicker`s hardness

٣- صلادة نوب المجهرية Knoop microhardness .

٤- صلادة روكويل Rockwell hardness

٥- صلادة شور للارتداد النسبي shore scleroscope hardness

٦- صلادة موز (نسبة لصلادة عشرة احجار سيراميكية مختلفة الصلادة)

Mohs hardness

٧- صلادة سونودر (تردد الرنين) Sonodur hardness

٨- صلادة المبرد (الصلادة بالخدش) File hardness

٩- صلادة روكويل السطحية Rockwell superficial hardness

وسيتم التطرق الى اهم طرائق اختبار الصلادة:

١-٢-١٠ اختبار برينيل Brinell Test :

تشتمل اداة الغرز في اختبار برينيل (الشكل 1-10) على كره فولاذية مصلده مثبتة في حامل مناسب، تسلط على سطح مهياً من قطعة الاختبار باستعمال حمل مناسب يحافظ على تسليطه لفترة خمس عشرة ثانية. ويقاس قطر الاثر الدائري المتخلف عند السطح بعد ازالة الحمل باتجاهين عند زوايا قائمة باستخدام مجهر مدرج واطى التكبير، ثم يؤخذ معدل القطر (متوسط القطر).

ويمكن حساب صلادة برينيل (HB) من المعادلة التالية:

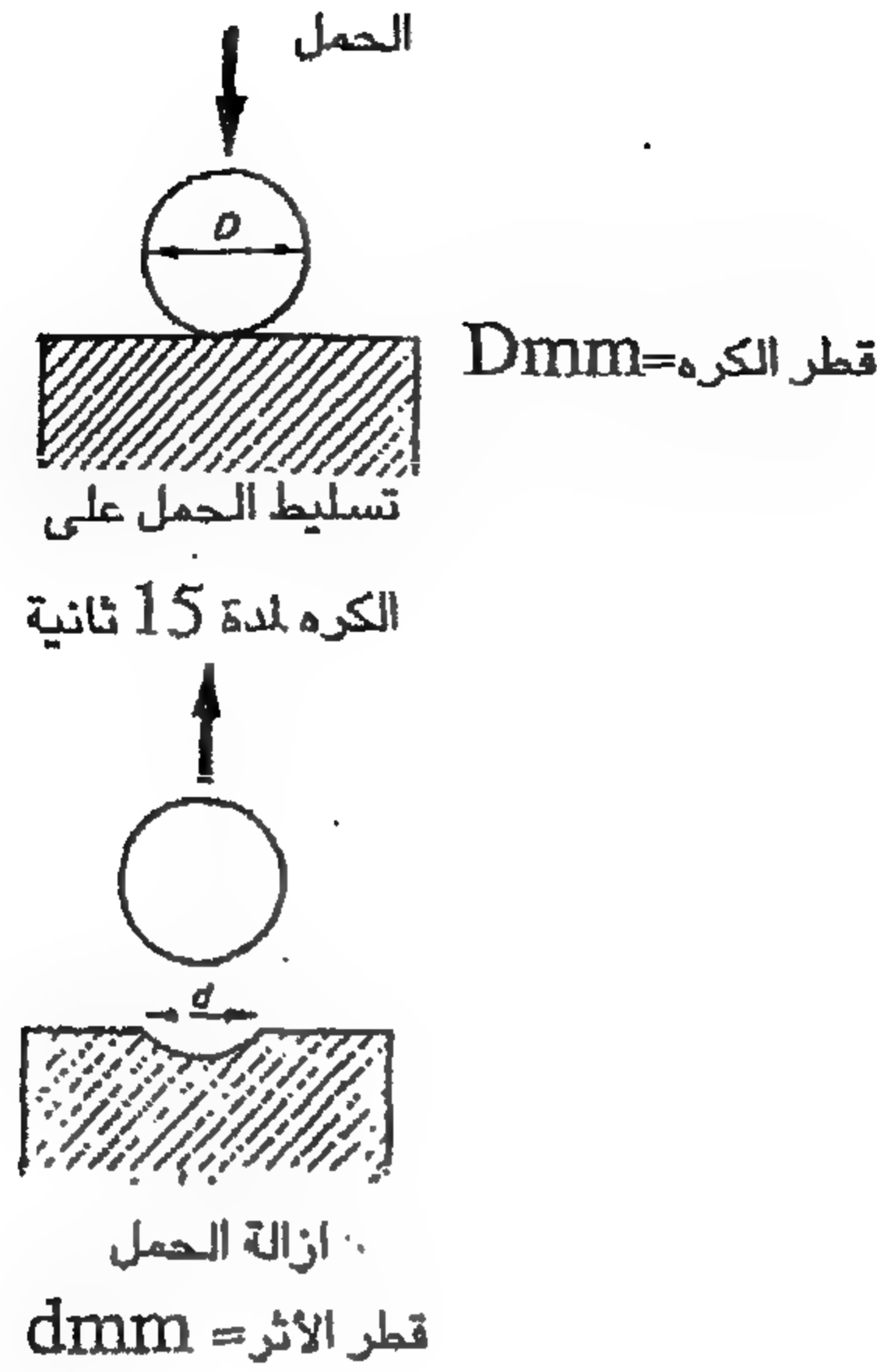
$$\text{صلادة برينيل} = \frac{\text{الحمل (kgf)}}{\text{مساحة السطح المنحني من الاثر (mm}^2\text{)}}$$

اي ان

$$HB = \frac{F(kgf)}{\frac{1}{2} \pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}] \text{mm}^2} \dots\dots\dots (1-10)$$

الشكل (1-10) اختبار

صلادة برينيل.



حيث أن

D = قطر الكرة (ملم) و d = قطر الاثر الدائري (ملم) و F = الحمل، الذي تكون وحداته في اختبار الصلادة كغم . قوة (kgf) حيث ان :

$$9.8N=1kgf \text{ (نيوتن).}$$

ولتجنب الحسابات الشاقة يمكن ايجاد صلادة برينيل من جداول معده لهذا الغرض تربط الصلادة بقطر الاثر . ويخص كل جدول . حمل و قطر كره معينين وعند اجراء اختبار الصلادة لابد من مواجهة بعض المتطلبات. اولها ان عمق الاثر يجب الا يكون كبيراً للغاية نسبة لسماك قطعة الاختبار وإلا فإن المنضده الحاملة لقطعة الاختبار ستتحمّل الحمل وليس قطعة الاختبار ذاتها. ويجب الا يقل سمك قطعة الاختبار للمواد اللينة عن 15 ضعف من عمق الاثر بينما لا يقل عن 7 أضعاف من عمق الاثر للمواد الصلدة.

ان كرة بقطر 1 و 2 و 5 و 10mm متوفرة ، ولابد من اختيار قطر كره يناسب

سمك قطعة الاختبار مع الاخذ بالاعتبار بأنه يمكن استخدام الكرة الاكبر حجماً. وربما تتقرر دقة النتائج على قطر الكرة الملائم. ويجب اختيار حمل يعطي أثراً بحجم معقول.

لقد تم معايرة النسبة $\frac{F}{D^2}$ لعدد من المواد المختلفة حيث أن (F) هي الحمل (kgf) و D هو القطر (mm)، لغرض الحصول على قيم معقولة يمكن مقارنتها. وقد تم اخذ اربعة قيم عيارية للنسبة $\frac{F}{D^2}$ هي 1 و 5 و 10 و 30 وكما مبين في الجدول (1-10).

الجدول (1-10) القيم العيارية لـ $\frac{F}{D^2}$ (اختبار برينيل):

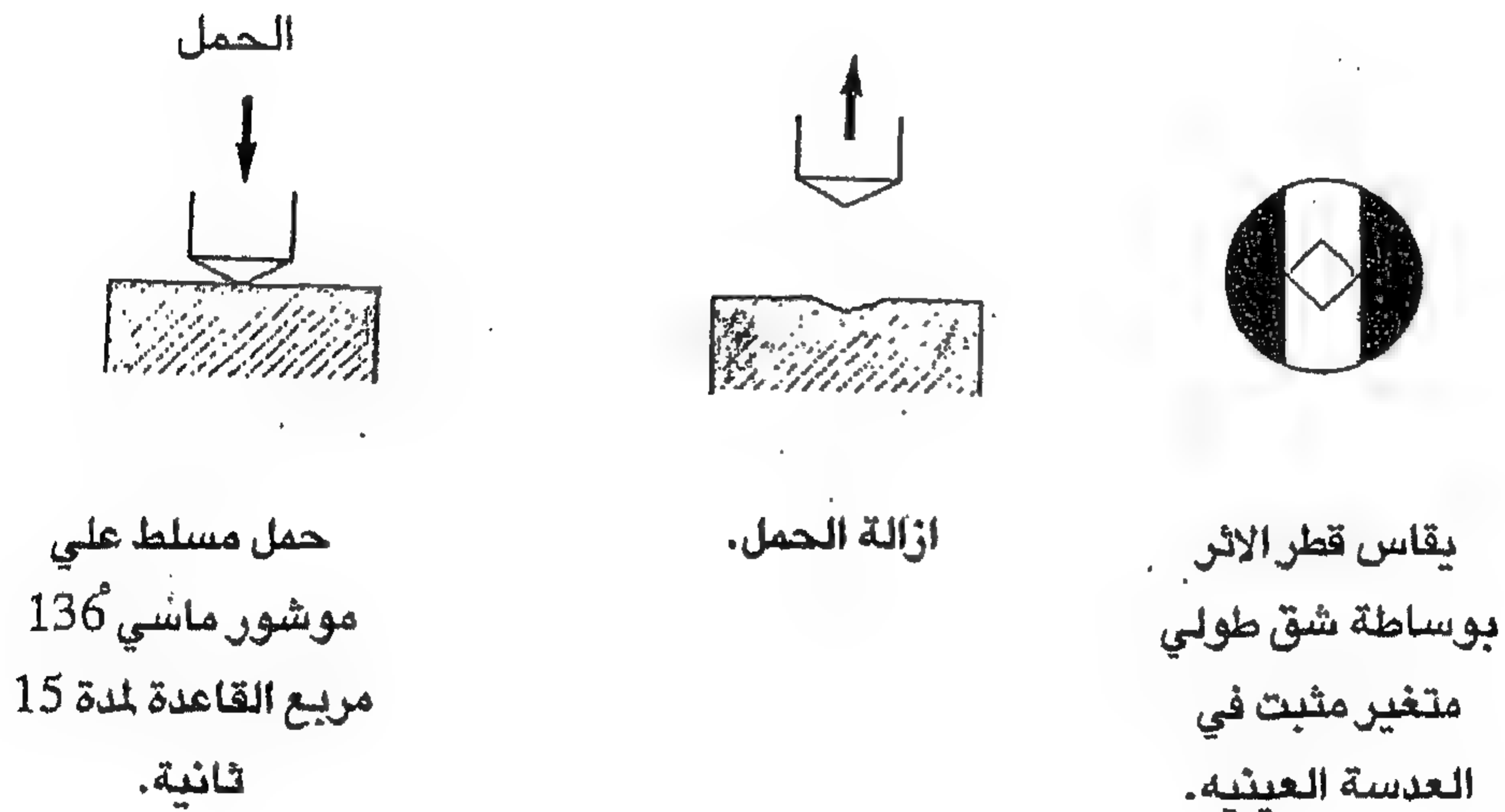
الحمل (kgf) . قوة				قطر الكرة D (mm)
القصدير والرصاص وسبائكهما $\frac{F}{D^2} = 1$	الألنيوم $\frac{F}{D^2} = 5$	النحاس وسبائك النحاس وسبائك الالمنيوم $\frac{F}{D^2} = 10$	الفولاذ وحديد الزهر $\frac{F}{D^2} = 30$	
1 kgf	5 kgf	10 kgf	30 kgf	1
4 kgf	20 kgf	40 kgf	120 kgf	2
25 kgf	125 kgf	250 kgf	750 kgf	5
100 kgf	500 kgf	1000 kgf	3000 kgf	10

ويلحق برمز صلادة برينيل عدد يبين قطر الكرة المستخدمة والحمل المسلط. ويظهر من 248HB 10/3000 بأن صلادة برينيل هي 248 تم الحصول عليها باستخدام كرة قطرها 10mm وحمل مسلط مقداره 3000kgf.

ولا يعول على اختبار برينيل في اختبار المواد التي تبلغ صلابتها أعلى من 450 وذلك لاحتمال تشوه أداة الغرز (الكره المصنوعة من الفولاذ المصلد Hardened steel). ويكون اختبار برينيل أثراً كبيراً نسبياً، يكون مرغوباً فيه عندما يُراد الحصول على متوسط الصلادة لمادة غير متجانسة (Heterogenous material) كحديد الزهر الرمادي والنحاس الأصفر (brass) ذو الطورين ($\alpha+\beta$). مع ان الاثر الكبير قد يعترض عليه.

٢-٢-١٠ اختبار فيكرز Vickers Test :

أبعد اختبار صلادة فيكرز (الشكل 2-10) الحاجة الى تحديد نسبة $\frac{F}{D^2}$ الصحيحة وذلك باستخدام أداة غرز موشوريه ماسيه مربعة القاعدة (square-based diamond pyramid indenter) لاتتشوه بسهولة وتعطي آثار متشابهة هندسياً تحت احمال مختلفة. لذا فإن دقة النتائج لن تتباين مع عمق الاثر. مع ذلك لابد من ملاحظة العلاقة بين عمق الاثر وسمك قطعة الاختبار.



الشكل (2-10) اختبار فيكرز.

وتسلط اداة الغرز الماسية التي تكون بهيئة موشور قائم ذي قاعدة مربعة وزاوية 136° ما بين الاوجه المتقابلة على السطح المهيأ من مادة الاختبار تحت حمل معين. وينتج الماس اثراً مربعاً ويؤخذ متوسط طولي القطرين (Diagonal length) اللذين يقاسان باستخدام مجهر ذا شق طولي متغير مثبت في العدسة العينية (eye-piece). يتم تنظيم عرض الشق بحيث تتطابق حافته مع زوايا الأثر. ويتم الحصول على طول الضلع القطري من دوران العداد المعشق بحركة الشق الطولي. ثم تحول القراءة العينية الى رقم صلادة فيكرز (HV) بالرجوع الى او بتطبيق العلاقة الناتجة من تعريف صلادة فيكرز وكالاتي:

$$\text{صلادة فيكرز (HV)} = \frac{\text{الحمل (kgf)}}{\text{مساحة سطح الاثر (mm}^2\text{)}}$$

$$HV = \frac{F}{\frac{d^2}{2 \sin \frac{1}{2} (136^\circ)}} = \frac{2F \sin 68^\circ}{d^2}$$

$$HV = 1.854 \frac{F}{d^2} \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

حيث تمثل

F الحمل kgf.

d معدل قطر الاثر mm.

ويمكن استخدام واحد من الاحمال 2.5 و 5 و 10 و 20 و 30 و 50 و 100 kgf . اعتماداً على صلادة وسمك المادة المراد اختبارها . ويتم التحكم بمعدل وزمن التحميل (15sec) اليأ بواسطة مكبس يعمل في نبيطه زيتيه (oil dashpot) ويلحق

الرمز HV بعدد يبين الحمل المستخدم في الاختبار ، وهكذا فإن HV/30 650 يدل على ان صلادة فيكرز هي 650 تم الحصول عليها عند حمل مقداره 30kgf .

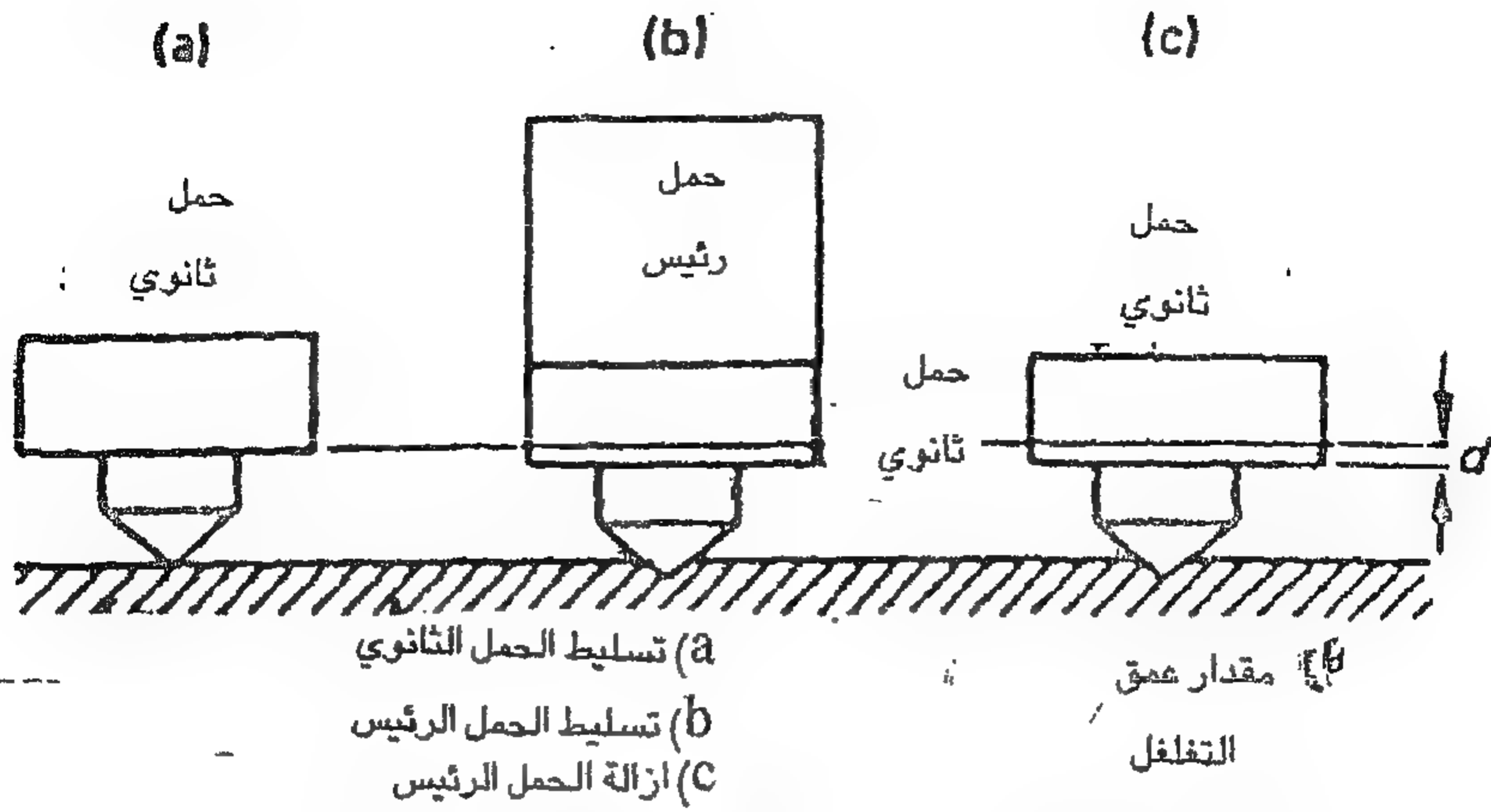
وبما ان الاثر الناتج بوساطة الماس أصغر بكثير من الاثر الناتج عن اختبار برينيل، لذا تحتاج مادة الاختبار الى صقل انعم عند اختبارها بصلادة فيكرز. وهذا يعني ان اختبار فيكرز اكثر ملائمة لاختبار الاجزاء المصقولة (المنجزة) مقارنة باختبار برينيل. يزودنا اختبار فيكرز بمقياس صلادة يلائم المواد اللينة جداً الى الصلدة جداً.

ان صلادة فيكرز وبرينيل متساوية تقريباً ولغاية رقم الصلادة 300 لكنه عند القيم الاعلى فإن نتائج برينيل تكون أقل لتشوه اداة الغرز. وكما بينا آنفاً لايعول على رقم صلادة برينيل عند اعلى من 450. ويجب ان لا تقل صلادة الكره الفولاذية المصلدة والمستخدمه في اختبار برينيل عن 850 صلادة فيكرز (HV) .

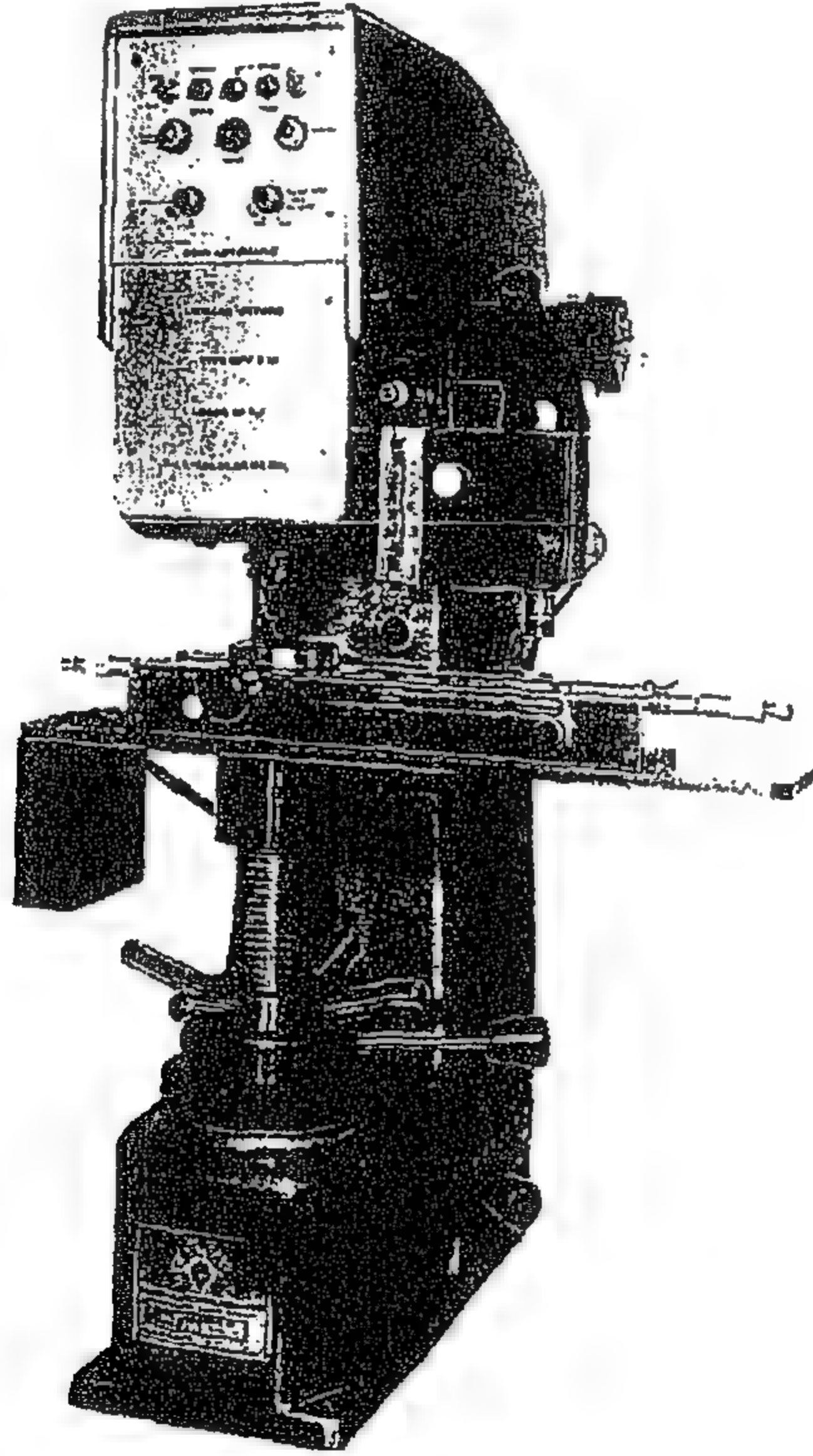
٣-٢-١٠ اختبار روكويل : Rockwell Test

يقاس عمق الاثر في اختبار روكويل (الشكل 10-3) بجهاز قياس خاص. ويظهر ذلك على القرص المدرج (Dial) كقيمه صلاده (الشكل 10-4) ولايشتمل هذا الاختبار على قياسات لاحقة للأثر.

تثبت قطعة الاختبار على منضدة الجهاز ويجعل سطح الجزء المراد اختباره بتماس مع اداة الغرز تحت حمل ثانوي (minor - Load) مقداره 10kgf للتخلص من الارتخاء (Slack) في المنظومة ثم يصفر مؤشر القرص المدرج ويسلط الحمل الرئيس (major load) . وعندما تستقر قراءة مؤشر القرص المدرج يزال الحمل الرئيسي. وتبقى قطعة الاختبار تحت تأثير الحمل الثانوي بينما تقرأ قيمة الصلادة مباشرة على مؤشر القرص المدرج. وتتوفر تسعة مقاييس مدرجة للصلادة (تشتمل على A الى K ولكن المقاييس B و C هما الاكثر شيوعاً في الاستعمال وتفصيلهما مبينه في الجدول (10-2) .



الشكل (3-10) اختبار صلادة روكويل (Rockwell).



الشكل (4-10) جهاز اختبار صلادة روكويل.

يقسم القرص المدرج الى 100 تدريجة، كل منها يمثل نقطة واحدة على مقياس الصلادة المدرج ويرفق الرمز HR بحرف (مثل B أو C) يبين مقياس الصلادة المستخدم.

جدول (2-10) مقياس اختبار روكويل للصلادة

المقياس	اداة الغرز	الحمل kgf		
		الثانوي	الرئيسي	المجموع
B	كره فولاذية قطرها 1.6mm	10	90	100
C	مخروط ماسي 120°	10	140	150

إن مقياس صلادة روكويل المدرج غير تناسبى ، فعند قيم الصلادة المنخفضة فإن زيادة بمقدار واحد في قيمة صلادة روكويل (HRC) تقابلها زيادة مقدارها حوالي (5) في صلادة فيكرز (HV) بينما عند قيم الصلادة العالية فإن زيادة بمقدار واحد في صلادة روكويل (HRC) ربما يقابلها زيادة مقدارها (40) في صلادة فيكرز. وهكذا فإن مقياس روكويل ليس بدقة مقياس فيكرز في تمييز الاختلاف البسيط في صلادة المواد الصلده. ومع ذلك فإنه يناسب الاختبارات النمطية السريعة للمواد تامة الصنع (المنجزه) . ويستخدم مقياس (C) غالباً للفولاذ المصلد بينما يستعمل المقياس (B) للفولاذ غير المصلد والسبائك اللاحديدية الصلده.

٤-٣-١٠ اختبار صلادة روكويل السطحية:

يتشابه اساس هذا الفحص مع طريقة روكويل المألوفة ولكن باستخدام وزن اقل لذا يمكن فحص عينات ارق. ان نوع مادة الغرز المستخدمة ومقدار الحمل التمهيدي والإضافي ومجموع الاحمال معطاة في الجدول (3-10).

يسبق الرمز HR قيمة الصلادة ويرفق بالحمل الكلي kgf وحرفاً يبين مقياس الصلادة السطحية الخاص المستعمل. فالقيمة التالية 70HR30N تظهر ان صلادة روكويل 70 أجريت على مقياس 30N (أداة الغرز مصنوعة من ماس مخروطي الشكل) وبحمل 30kgf. يبين الجدول (4-10) مدى صلادة بعض المواد المعدنية الشائعة الاستخدام

جدول (3-10) مقياس اختبار صلادة روكويل السطحي.

الحمل (kgf)			المقياس اداة الغرز
المجموع	الإضافي	الابتدائي	
15	12	3	مخروط ماسي 120° [15N 30N 45N
30	27	3	
45	42	3	
15	12	3	كرة فولاذية قطرها 1.6mm [15T 30T 45T
30	27	3	
45	42	3	

جدول (4-10) المديات النموذجية لصلادة بعض المواد المعدنية الشائعة

المادة	الصلادة	المادة	الصلادة
براص (كمصبوبة)	صلادة برينيل 60-100	حديد زهر ابيض	صلادة فيكرز 420-450
فولاذ منخفض	صلادة برينيل 120-140		صلادة روكويل 42-44
الكاربون (مدحور)			
على الساخن)		سطح فولاذ متترد	صلادة فيكرز 1100-1000
حديد زهر رمادي	صلادة برينيل 150-240		
فولاذ متوسط	صلادة برينيل 200-250		
الكاربون			

كما يبين الجدول (5-10) مقارنة تقريبية لمقاييس الصلادة الخاصة بالمواد اللينة (كالمعادن اللاحديدية وسبائكها الرصاص والالمنيوم والنحاس..) والمواد الصلده (كالفولاذ والتنكستن وغيرها).

جدول (5-10) مقارنة تقريبية لمقاييس الصلادة الثلاثة:

مواد لاحديدية			فولاذ		
صلادة فيكرز	صلادة برينيل	صلادة روكويل (B)	صلادة فيكرز	صلادة برينيل	صلادة روكويل (B)
20	19	-	150	143	80
40	38	-	170	162	87
60	57	-	190	181	92
80	76	32	200	190	94
100	95	53	210	200	96
120	114	66	220	209	98
150	143	80	230	219	99

يتبع جدول (5-10):

فولاذ مصلد		
صلادة فيكرز	صلادة برينيل	صلادة روكويل (C)
230	219	20
250	238	24
300	285	31
350	333	36
400	380	41
450	428	44
500	-	47
600	-	54
700	-	58
800	-	62
900	-	65
1050	-	68
1170	-	70

١٠-٢-٥ طريقة نوب لاختبار الصلادة:

يستخدم حمل (Load) صغير في اختبار صلادة نوب حيث يصل الى (25g) للمساحات الصغيرة جداً. ان اغلب أجهزة الصلادة المجهرية (microhardness ma-chines) مزودة بتسهيلات فحص صلادة نوب اضافة الى صلادة فيكرز. ان الإداة المتغلغلة في هذا الاختبار هي هرم ذو مقطع معيني مختلف المحاور (elongated pyramid) فيه نسبة طول المحور الكبير الى الصغير تساوي 7 الى 1. ان اسلوب اختبار صلادة نوب مشابهة لأسلوب اختبار صلادة فيكرز. يمكن أن تقرأ قيمة صلادة نوب مباشرة على شاشة رقميه موجوده في الجهاز. أما وحدات الصلادة هنا فدعى وحدات نوب (Knoop units). اما أهم مميزات اختبار صلادة نوب على اختباري صلادة فيكرز وبرينيل فهي:

١- يعتبر بصوره عامه اختبار لاأتلافي.

٢- يمكن استخدامه لقياس المواد الرقيقه جداً.

٣- يمكن استخدامه لاختبار منطقة سطحية صغيرة جداً.

ويجب في هذا الاختبار ان يكون سطح النموذج ناعم ومسطح ونظيف وأفقي.

٦-٢-١ طريقة اختبار صلادة صونودر Sonodur hardness test:

عند اختبار صلادة الصونودر، يضغط قضيب مقبّض مغناطيسي مدبب ماسي (diamond- tipped magnetostrictive rod) ذو قطر مقداره (0.75mm) ضد النموذج المراد فحصه. ويستخدم ملف كهربائي (electrical coil) لذبذبة القضيب والتردد الاعظم الذي يتذبذب به القضيب يتم تحديده في الجزء الالكتروني في الجهاز. يدعى هذا التردد بتردد الرنين (resonant frequency) . تمتلك المادة الاصلد تردد رنين اعلى .

تحوّل قيمة تردد الرنين الى رقم صلاده. يقرأ جهاز صونودر، الصلادة بوحدات صلادة برنيل (BHN) .

مميزات اختبار صلادة صونودر:

جهاز الصونودر صغير ويمكن حمله بسهولة. يعطي الاختبار نتائج سريعة جداً ولايتلف النموذج. طريقة اختبار صلادة صونودر احدث من بقية طرائق اختبار الصلادة الاخرى وتعتبر مضبوطة جداً.

٣-١٠ مقاومة الشد Tensile Strength

١-٣-١٠ الاجهاد والانفعال Stress and Strain

قبل الخوض في تفاصيل الاجهاد والانفعال لابد من الرجوع الى بعض خواص المادة. فكتلة الجسم هي كمية المادة التي يحتويها. ووحدة SI للكتله هي (kg) . وزن الجسم هي القوة التي يسلطها على أي شيء يرتكز عليه .

القوة = الكتلة × التعجيل (3-10)

ووحدة SI للقوة هي النيوتن (N) ، وهي القوة التي عند تسليطها على جسم كتلته 1kg تعطيه تعجيراً مقداره 1m/sec^2 . وقوة الكيلو غرام هي القوة التي عند تسليطها على جسم له كتلة 1kg تعطيه تعجيراً مقداره 9.8 m/sec^2 .
عند تسليط قوة أو حمل على مادة، فإنها تنتج اجهاداً في المادة. والاجهاد المؤثر على مادة هو القوة المسلطة لوحدة المساحة.

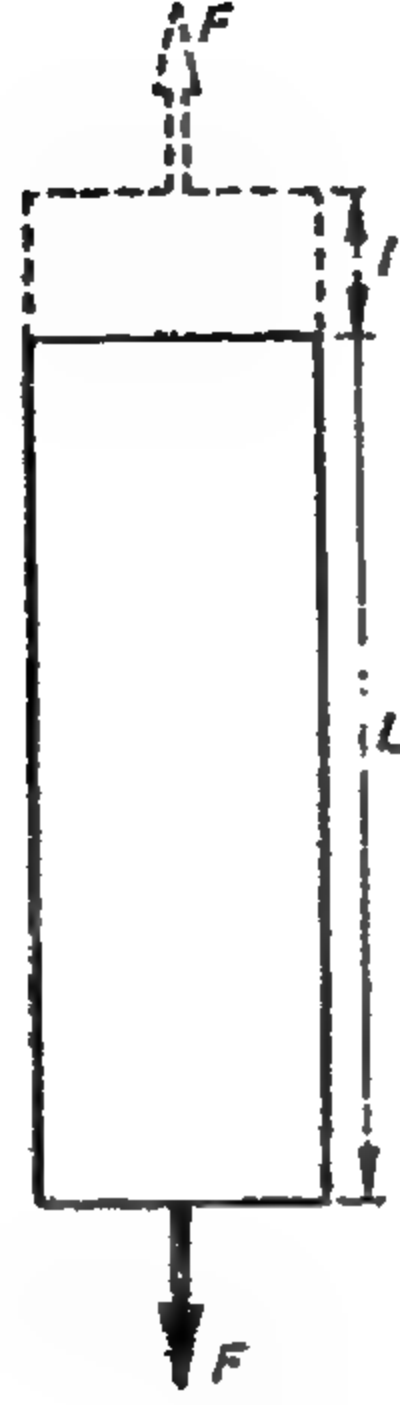
الاجهاد = $\frac{\text{القوة}}{\text{المساحة}}$ (4-10)

وحدة الاجهاد هي N/m^2 . ومن الملائم قياس الاجهاد بوحدات N/mm^2 عند الاختبار الميكانيكي.

$10^{-3}\text{m}=1\text{mm}$ ولذلك فإن $10^{-6}\text{m}^2=1\text{mm}^2$ كما أن

$$1\text{MN/m}^2=10^6\text{N/m}^2=1\text{N/mm}^2$$

وقد تكون الاجهادات في طبيعتها شدية (tensile) او انضغاطية (compressive) او قصية (shear). يبين الشكل (5-10) كتله معدنية في حالة شد، حيث تمثل "F" قوة الشد التي تزيد طول الكتله وتقلل من مقطعها العرضي. فإذا كانت مساحة المقطع العرضي "A" لكتلة المعدن فإن اجهادها الشدي يساوي $\frac{F}{A}$.
ويسمى التغيير في الابعاد الناتج عن الاجهاد بالانفعال (Strain). والانفعال في الشد (او الضغط) هو نسبة التغيير في الطول الى الطول الأصلي.



الشكل (5-10) قطعة معدنية تحت الشد .

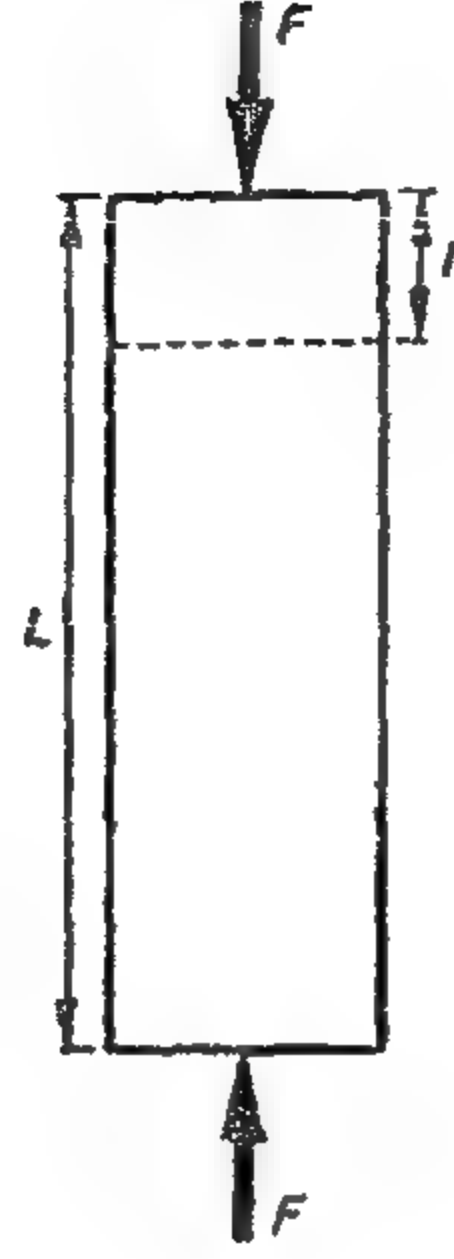
وهكذا ففي الشكل (5-10) .

$$\text{انفعال الشد} = \frac{\text{الزيادة في الطول}}{\text{الطول الأصلي}} = \frac{1}{L} \quad \text{..... (5-10)}$$

وبما ان الانفعال نسبة فهو اذن رقم مجرد من الوحدات ولا بد ان نعبر عن التغيير في الطول والطول الاصلي بنفس الوحدات . وقد يعبر عن الانفعال ايضاً بالنسبة المئوية.

في الشكل (6-10) تضغط القوة "F" المعدن ، لذلك تقلل طوله وتزيد من مقطعه العرضي ، وفي هذه الحالة فإن الاجهاد الانضغاطي يساوي $\frac{F}{A}$.

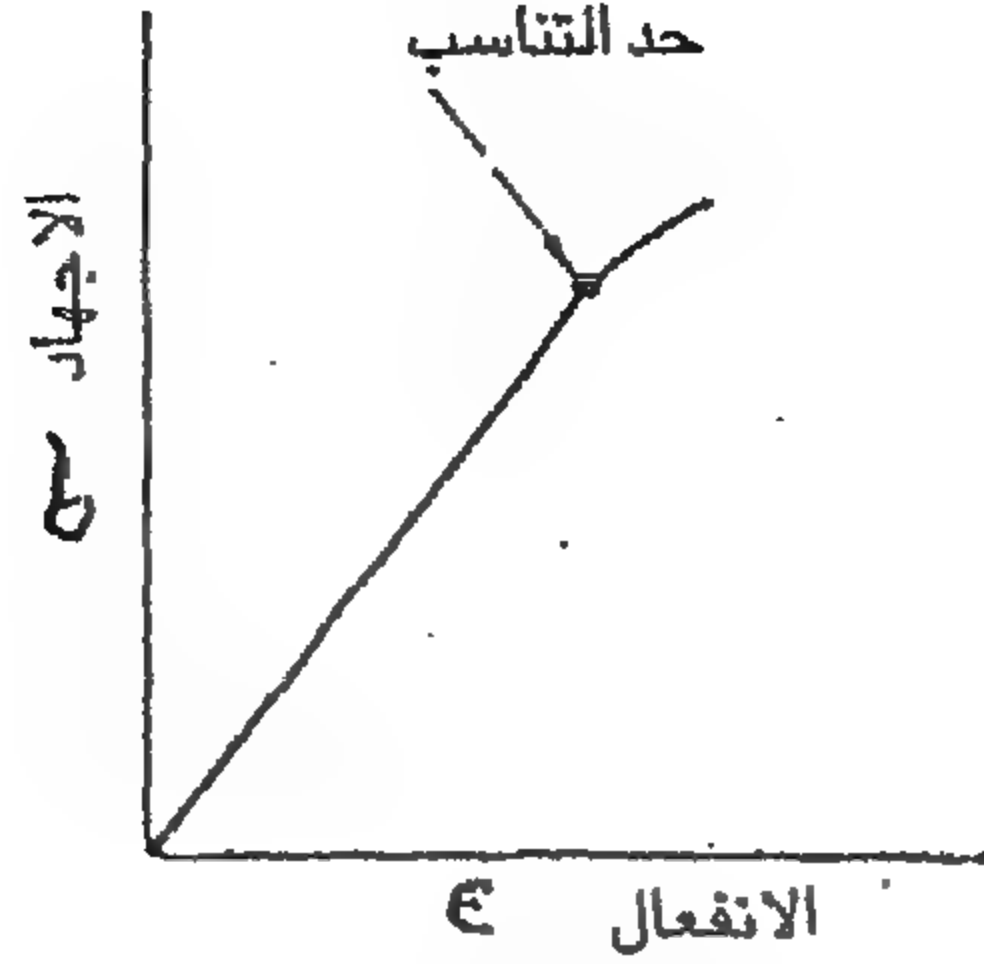
$$\text{انفعال الانضغاط} = \frac{\text{النقصان في الطول}}{\text{الطول الأصلي}} = \frac{1}{L} \quad \text{..... (6-10)}$$



الشكل (6-10) قطعة معدنية تحت الانضغاط.

وعند السلوك المرن (elastic behaviour) يُزال الانفعال الناتج في المادة المجهدة حالما يُزال الاجهاد، لذلك تعود المادة الى ابعادها الاصلية. و تبدي بعض المواد المعدنية خواصاً مرنة حتى عند اجهادات عالية نسبياً بينما تبدي مواد معدنية اخرى مرونة قليلة. وعند تحميل اي مادة مرنة تدريجياً اثناء الشد، فالإنفعال المرن الناتج يتناسب تناسباً طردياً مع الاجهاد المسبب له. وتعرف هذه العلاقة بقانون هوك (Hooke's Law). ويكون الرسم البياني للإجهاد/ الانفعال (الشكل 7-10) عبارة عن خط مستقيم يمر بنقطة الصفر. وميل هذا الخط المستقيم (الاجهاد/ الانفعال) ثابتاً للمعدن المعين. ويعرف هذا الثابت بمعيار يونك (Young's modulus) او معيار المرونة (modulus of elasticity) ويرمز له بالرمز E لذلك فإن:

$$\text{معيار المرونة (E)} = \frac{\text{الاجهاد}}{\text{الانفعال}} \quad (7-10) \dots\dots\dots$$



الشكل (7-10) منحنى الاجهاد / الانفعال يبين حد التناسب.

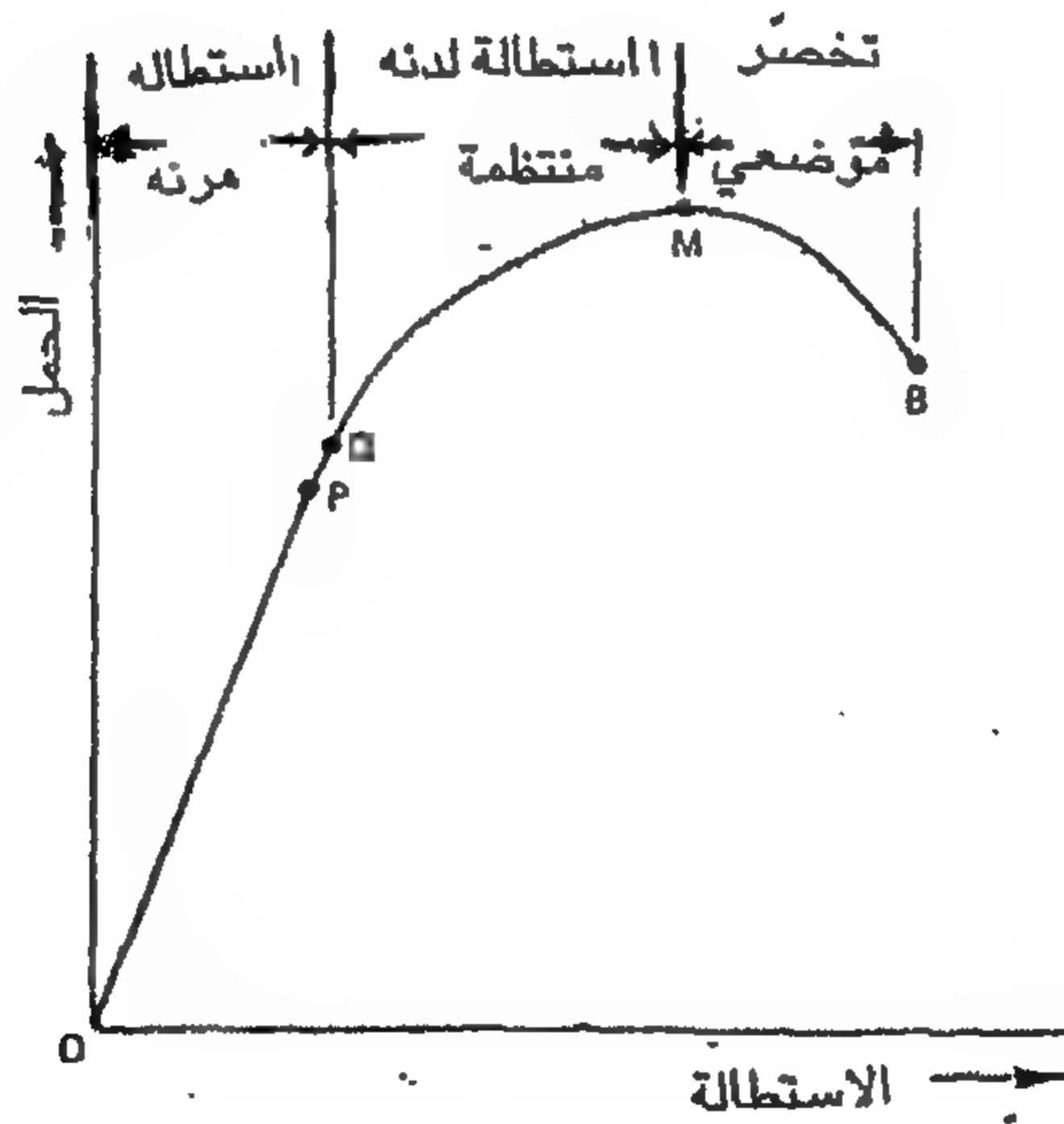
وبما أن الانفعال مقدار مجرد من الوحدات (Dimensionless) فإن لمعامل المرونة نفس وحدات الاجهاد. وتتحكم قيمة "E" بطبيعة الفولاذ وتبلغ حوالي $2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ للفولاذ. ولا تتأثر كثيراً بالمعاملة الحرارية وتنخفض مع زيادة درجة الحرارة. وكلما زادت قيمة E كلما كانت المادة أكثر مرونة.

ويبين الشكل (8a-10) جزءاً مثبتاً من أحد اطرافه وقد اجهد طرفه بقوة عمودية متجهه نحو الأسفل. وتميل القوة (F) لإحداث فشل وكما مبين في الشكل (8b-10) وتدعى بالقوة القصية (shearing force) وسيحدث كسر على طول المستوى الموازي للقوة المسلطة، لذلك فإن الجزء الواقع على يمين المستوى ينزلق إلى الأسفل نسبة إلى الجزء الواقع إلى اليسار. وميزة التحميل القصي واجهاد القص الناتج أن اتجاههما يوازي مساحة المقطع العرضي المقاومة للكسر.

$$\text{اجهاد القص} = \frac{\text{قوة القص}}{\text{مساحة المقطع العرضي}} = \frac{F}{A} \quad (8-10) \dots\dots$$

٢-٣-١٠ الرسوم البيانية للحمل - الاستطالة:

إذا سُلط حمل شدي يتزايد تدريجياً على قطعة اختبار ، وقيست الاستطالة باستمرار، يمكن رسم شكلاً بيانياً بين الحمل والاستطالة، ويمكن الحصول على عدة أنواع من الرسوم البيانية (كما سيأتي لاحقاً) اعتماداً على طبيعة المعدن وحالته. ويبين الشكل (9-10) رسماً بيانياً نموذجياً للحمل - الاستطالة يتلائم مع عدة مواد معدنية مجهدّة شدياً. ففي البدايه يزداد طول قطعة الاختبار ويتناسب طردياً مع زيادة الحمل المسلط وعلى طول (OP) وهكذا يتضح قانون هوك. ولا يؤخذ بقانون هوك بعد النقطة (P) التي تُعرف بحد التناسب (Proportionality Limit). بصورة عامة هناك نقطة أخرى (Q) التي تحتفظ المادة بمرونتها عندها، أي أن قطعة الاختبار تعود إلى أبعادها الأصلية عند إزالة الحمل. وتعرف نقطة "Q" بأنها حد المرونة (elastic limit) للمادة. والنقطتان متطابقتان اعتماداً على حساسية (sensitivity) الاختبار.



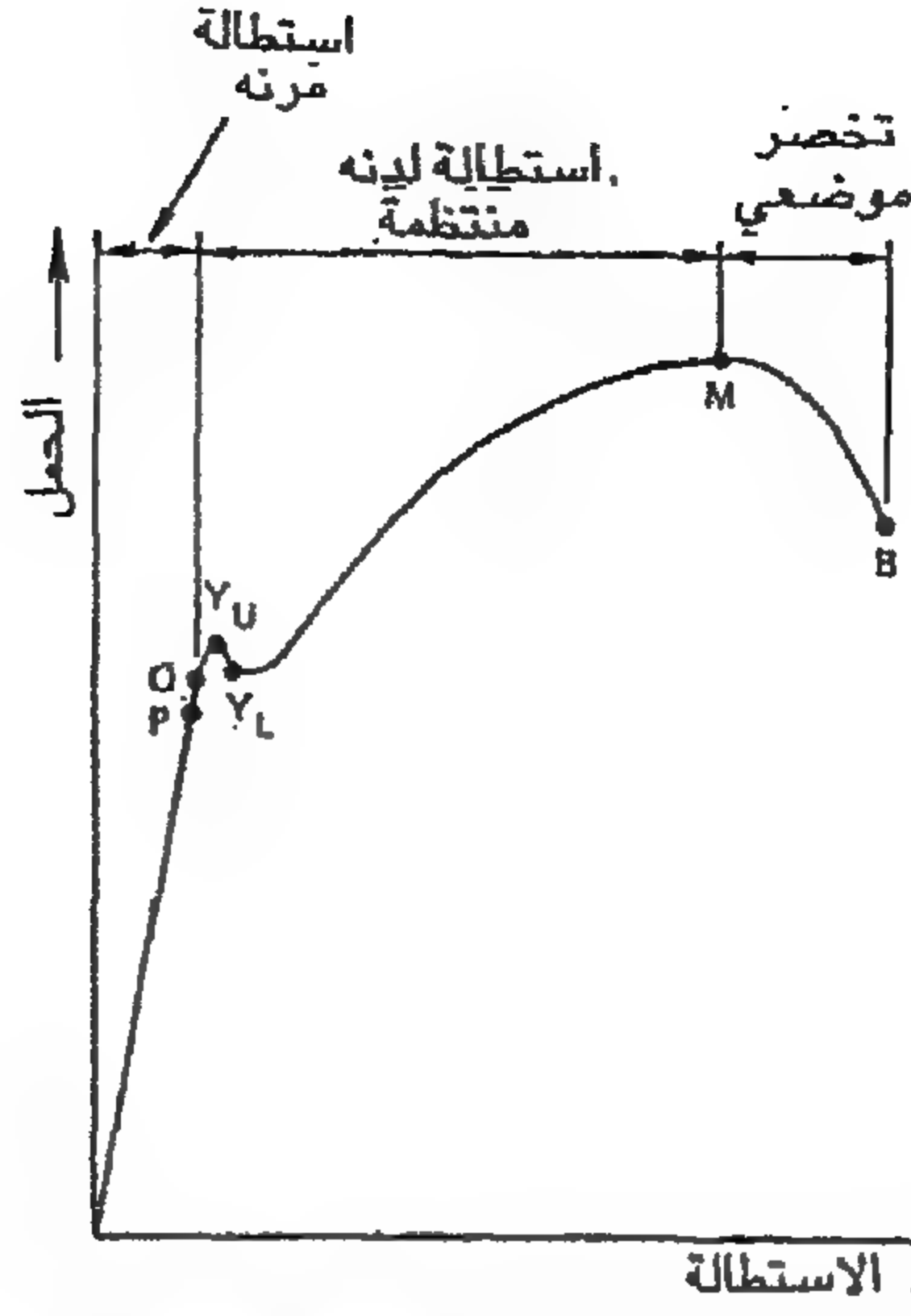
الشكل (9-10) منحنى الحمل - الاستطالة الخاص بعدة مواد معدنية.

واستطالة قطعة الاختبار قليله جداً لحد نقطة (Q) ويحتاج قياسها الى استخدام جهاز حساس يسمى مقياس الاستطالة (extensometer). وتكون الاستطالة بعد نقطة (Q) دائمية (لاتزول الاستطالة بعد ازالة الحمل) ويسمى الانفعال غير المرن الدائمي بالانفعال اللدن (plastic strain) ،

وتستمر قطعة الاختبار بالاستطالة المنتظمة مع زيادة الحمل، حتى تصل الى أقصى حمل عند نقطة (M) وتصبح مساحة المقطع العرضي بعد هذه النقطة أصغر، ويحدث التخصر (necking) (يتكون العنق). وينتج عن ذلك الحصول على زيادة في الاجهاد مع انخفاض في الحمل، لذا فإن حمل الكسر الحقيقي عند نقطة (B) اقل من الحمل عند نقطة (M) مع أن الاجهاد الحقيقي عند (B) اكبر من الاجهاد عند (M). وتظهر في حالة الفولاذ منخفض الكربون غير المصلد عند تجاوز حد المرونة، نقطة تحدث عندها زيادة في التمدد دون زيادة في الحمل. وتسمى هذه النقطة نقطة الخضوع (yield point) وتستحق هذه النقطة تأملاً أكبر.

٣-٣-١ الرسم البياني للحمل - استطالة لفولاذ منخفض الكربون غير المصلد:

تبين من الشكل (10-10) انه بزيادة الحمل الشدي المسلط بعد نقطة (Q) نصل الى نقطة تحدث عندها استطالة مفاجئة وكبيره نسبياً دون زيادة اضافيه في الحمل، وهذه هي نقطة خضوع. وهناك احياناً هبوط بسيط في الحمل عند نقطة الخضوع فتعطي نقطة خضوع عليا " Y_u " (Upper yield point) ونقطة خضوع سفلى " Y_L " (Lower yield point) وتتأثر القيمة عند Y_u (أعلى حمل قبل حدوث الاستطالة المفاجئة) بالإنهاء السطحي (surface finish) لقطعة الاختبار وبمعدل التحميل (rate of loading). وتحدد نقطة الخضوع السفلى - عادة - (اي التحميل المسبب لاستطالة كبيرة) نظراً لقابلية تكرارها.



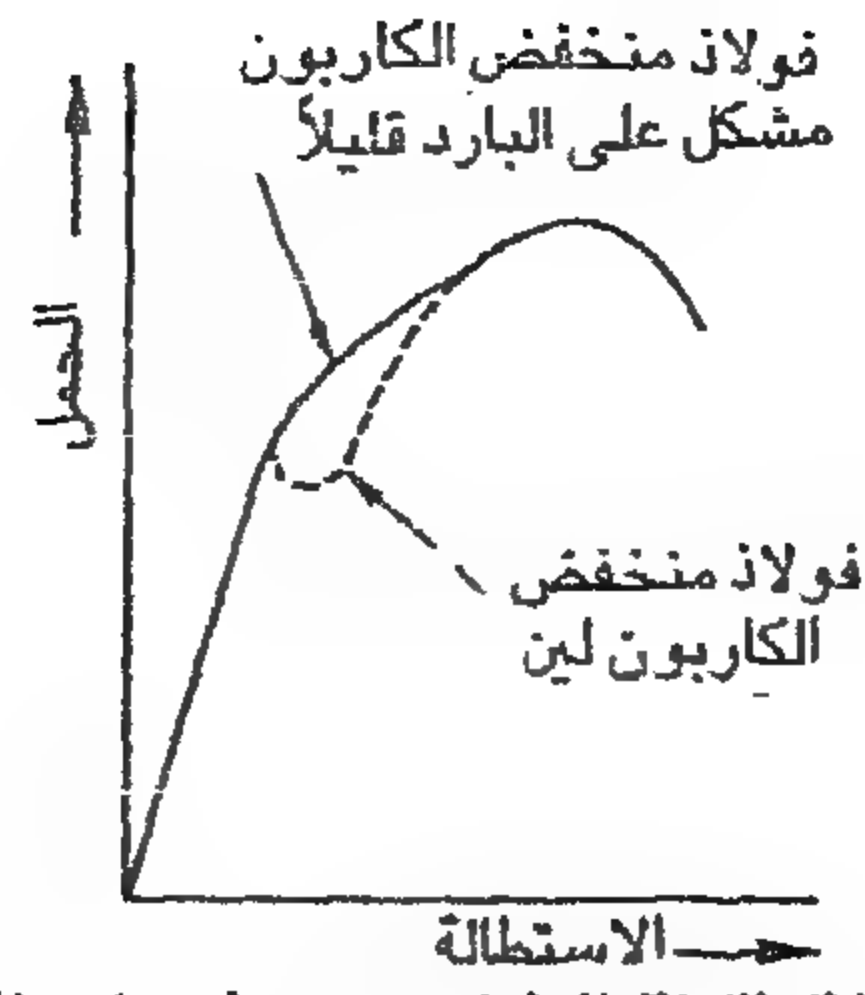
الشكل (10-10) منحنى الحمل - الاستطالة لفولاذ منخفض الكربون.

ويساعد وجود نقطة خضوع واضحة على تكون علامات الانفعال (تسمى بخطوط لودير Luder's lines) على سطح الفولاذ. وعند زيادة الحمل بعد نقطة الخضوع يتصرف الفولاذ كما هو موصوف في الرسم البياني للحمل - الاستطالة. وتُظهر بعض المواد فقط نقط خضوع واضحة. وتزال نقطة الخضوع في حالة الفولاذ منخفض الكربون بالتشكيل على البارد بمقدار بسيط (كمروور بسيط عند الدحو على البارد (Light cold rolling pass) وينتج عند ذلك منحنى حمل / استطالة بسيط (الشكل 11-10) ويبين الشكل (12-10) انواع مختلفة من منحنيات الحمل - الاستطالة لمواد معدنية.

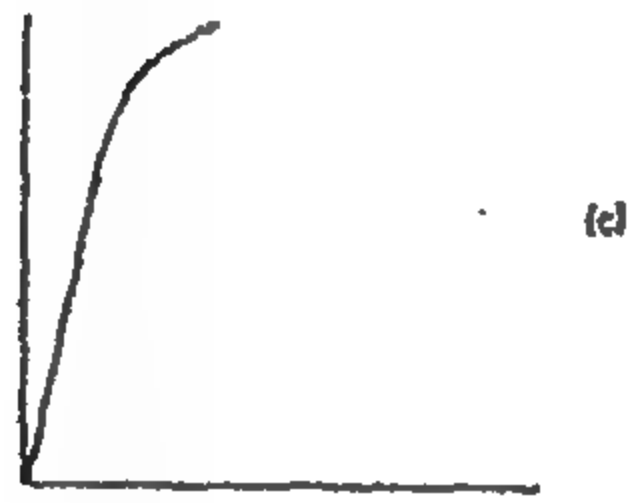
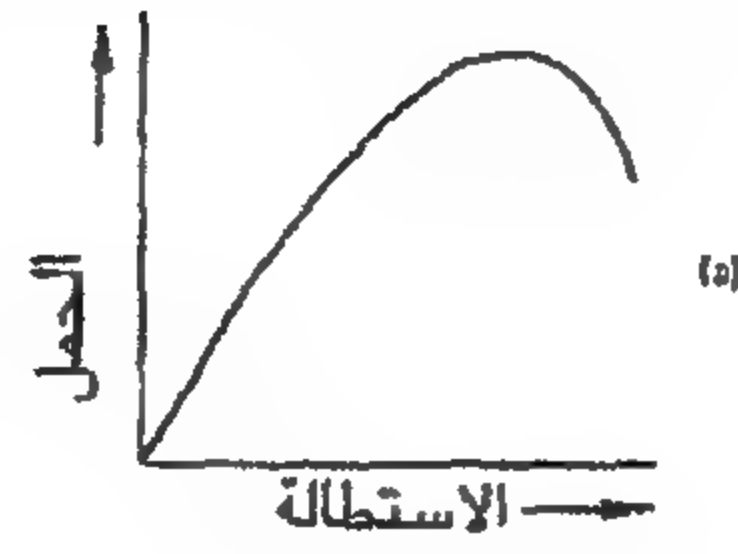
الشكل (13a-10) يمثل مادة ذات مرونة قليلة ولدونه كبيره وهو يخص العديد من المعادن النقية.

الشكل (13b-10) يمثل مادة ذات مرونة قليلة ولدونه صغيره جداً.

الشكل (13c-10) يمثل مادة ذات مرونة قليلة ولدونه محدودة.



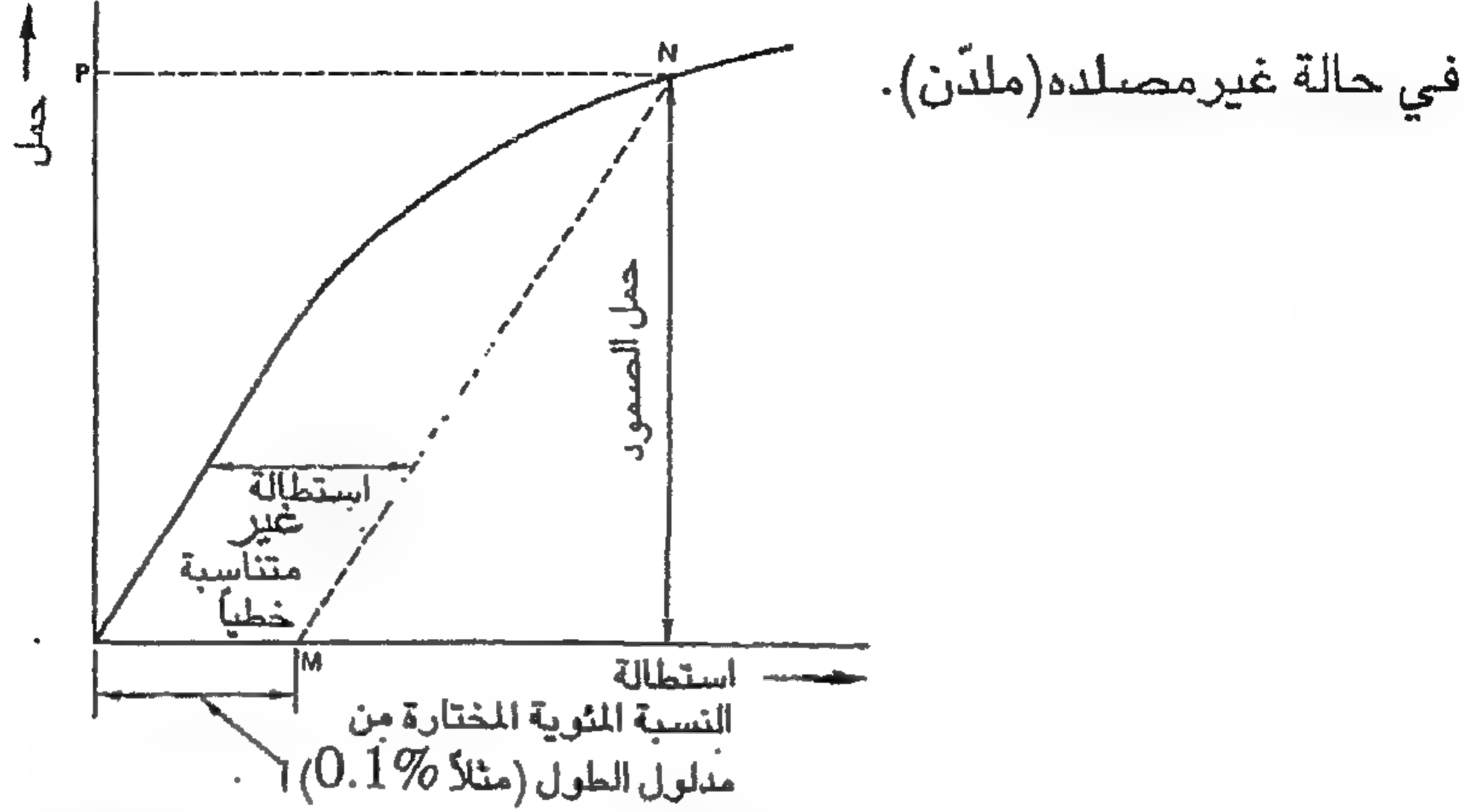
الشكل (10-11) إزالة نقطة الخضوع بتشكيل طفيف على البارد.



الشكل (10-12) أنواع منحنيات الحمل - الاستطالة الشائعة.

الشكل (13d-10) يمثل مادة ذات مرونة قليلة ولدونه جيدة.

الشكل (13e-10) يمثل مادة ذات مرونة قليلة ولدونه جيده كما في الشكل (d) ويظهر فيه - ايضاً - نقطة خضوع حادة . وهو يخص الفولاذ المنخفض الكربون



الشكل (13-10) كيفية ايجاد اجهاد الصمود.

١٠-٣-٤ اجهاد الصمود Proof stress :

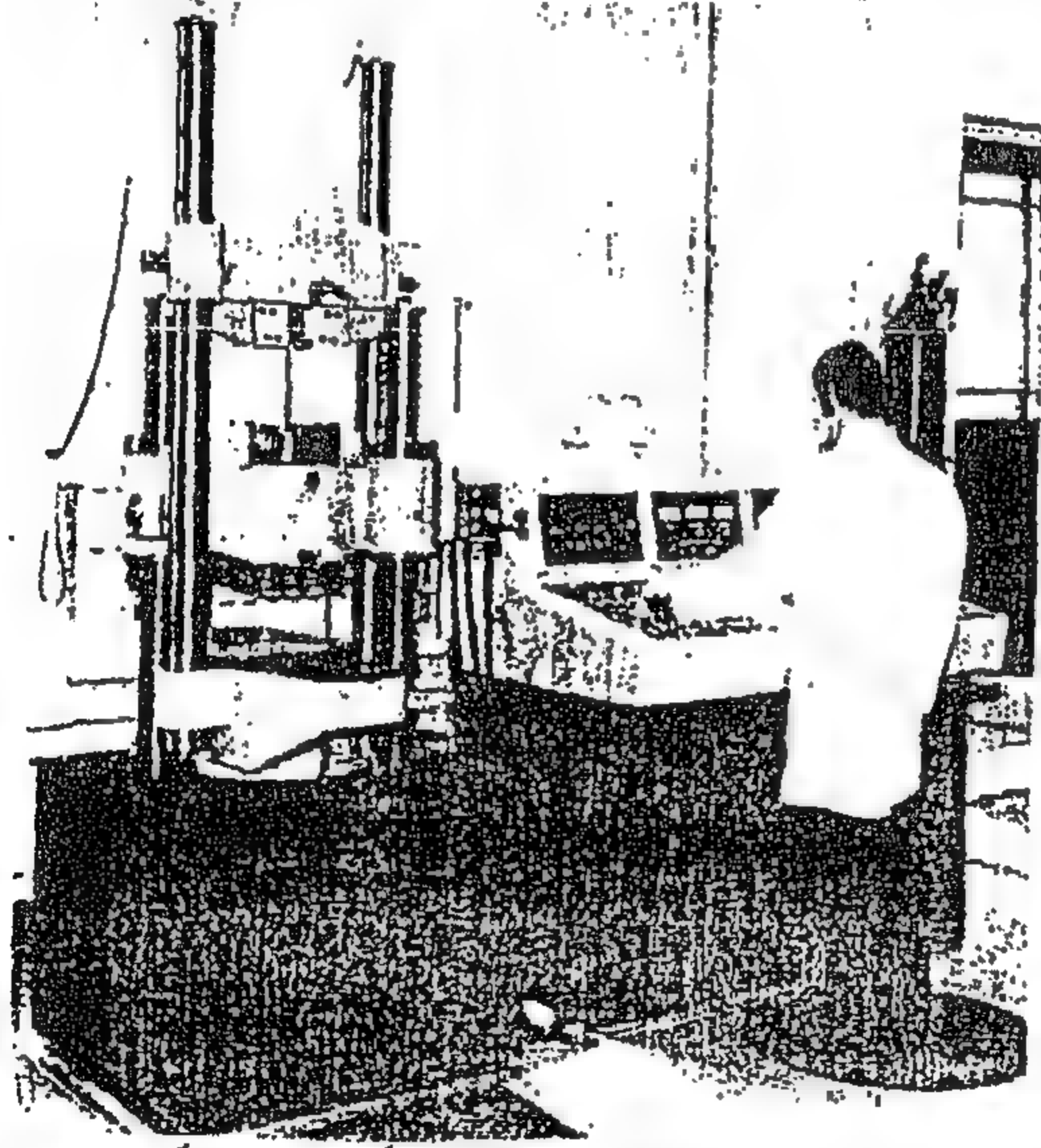
يستخدم اجهاد الصمود للمواد التي ليس لها نقطة خضوع حادة (كالفولاذ المصلد ومعظم المعادن والسبائك اللاحديدية) . وهو الاجهاد الذي ينتج عنه تمدد غير تناسبي (non - proportional) مساوياً الى نسبة مئوية معينه 0.5% أو 0.3% أو 0.1% (من مدلول مقياس الطول (gauge length) عندما يكون الحمل مسطاً. ومن الضروري استعمال مقياس استطالة قادر على قياس الاستطالة ضمن $\pm 0.005\%$ من مدلول الطول.

ويحدد حمل الصمود (Proof load) من منحنى الحمل - الاستطالة الشكل (13-10) ، حيث يرسم الخط "MN" مواز الى الجزء المستقيم من المنحنى وبمسافة "OM" التي تمثل النسبة المئوية الخاصه من مدلول مقياس الطول. وتعطي نقطة تقاطع "MN" مع المنحنى (اي نقطة N) حمل الصمود . فإذا كانت "OM" مساوية

الى 0.1% من مدلول مقياس الطول فإن "PO" هو 0.1% حمل الصمود والذي إذا قسم على مساحة المقطع العرضي الاصلي يعطي 0.1% اجهاد الصمود. ويرسم احياناً منحني الاجهاد - الانفعال بدلاً من الرسم البياني للحمل - الاستطالة وعندئذ يمكن قراءة اجهاد الصمود مباشرة من الرسم . ان دقة الرسم البياني للحمل - الاستطالة (اجهاد - انفعال) ضرورية جداً.

٤-١٠ اختبار الشد Tensile Testing :

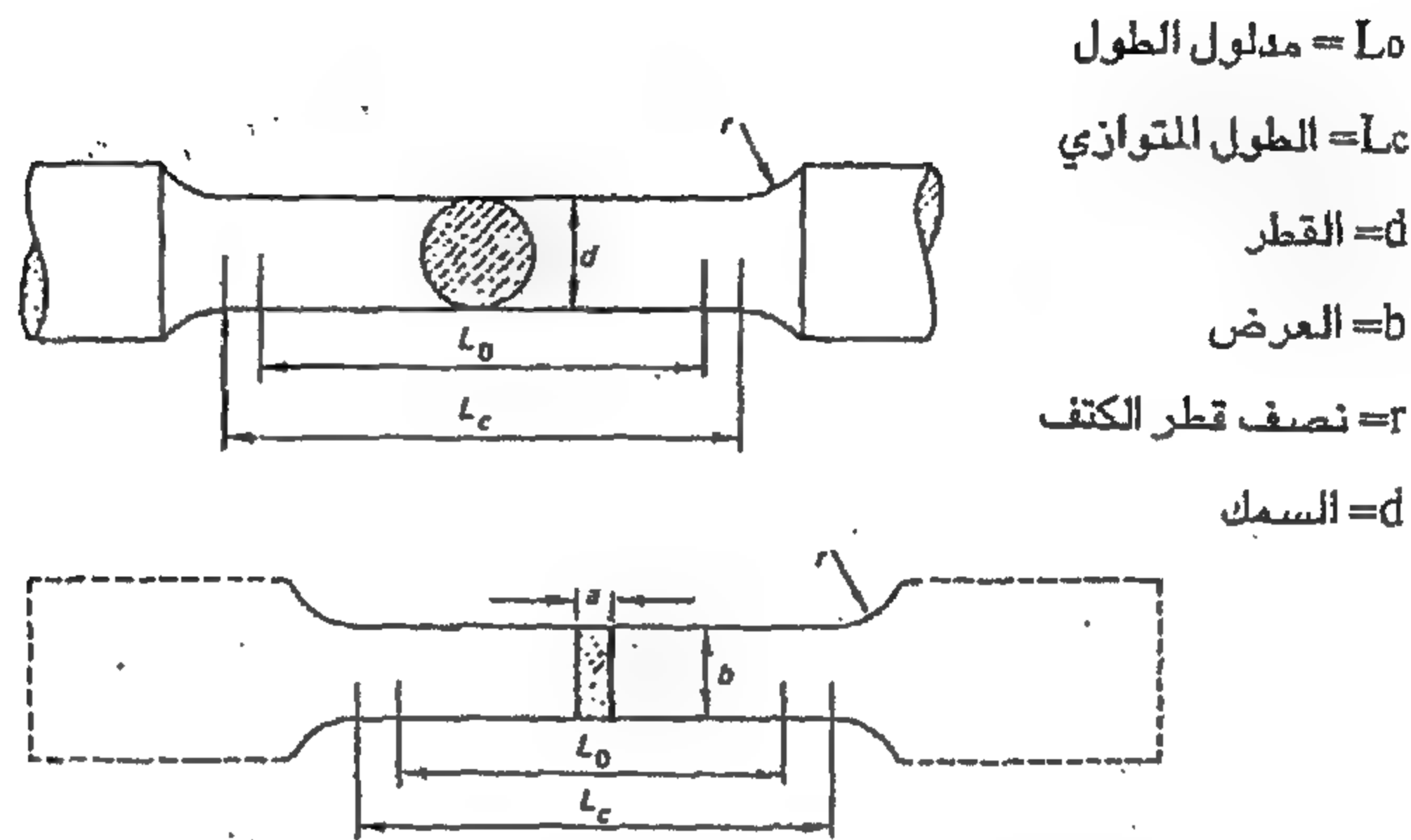
ان اختبار الشد أحد أكثر الاختبارات الميكانيكية استخداماً (الشكل 10-14). وتعتمد النتائج التي يتم الحصول عليها - الى حد ما - على حجم وشكل مقطع الاختبار . لذلك من المفروض تطابق ابعاد قطع الاختبار مع الابعاد القياسية (star-dard dimensions) كتطابقها مع المواصفة البريطانية B518 (طرائق اختبار شد المعادن).



الشكل (10-14) آلة اختبار شد شاملة.

وقد يكون المقطع العرضي لقطعة الاختبار مستديراً او مربعاً او مستطيلاً وكما مبين في الشكل (10-15). ويعرف مدلول مقياس الطول (gauge length) لقطعة الاختبار بأنه الجزء المتوازي المستخدم لقياس الاستطالة اثناء الاختبار او بعده.

ولتسجيل مدلول مقياس الطول " L_0 " لقطعة الاختبار يتم تأشير الجزء المتوازي بعلامتين قبل الاختبار. وقد لوحظ من الفقرة (10-3-2) ان قطعة اختبار الشد تستطيل بشكل منتظم حتى تصل الى أقصى حمل مسلط ثم تحدث استطالة موضعية (Local extension) لنشوء التخصر (necking) لذلك فإن الاستطالة الكلية تتكون من جزئين منفصلين:



الشكل (10-15) قطع اختبار الشد.

- أ- الإستطالة المنتظمة - التي تتناسب مع مدلول مقياس الطول .
- ب- الاستطالة الموضعية - التي لا تعتمد على مدلول مقياس الطول ولكنها تتغير مع تغير مساحة المقطع العرضي لقطعة الاختبار. وبينت التجارب العملية ان قطع الاختبار المتشابهة هندسياً لمعدن ما تشوه بطريقة متشابهة إذا كان:

$$\text{مقدار ثابت} = \frac{\text{مدلول مقياس الطول}}{\sqrt{\text{مساحة المقطع العرضي}}} = \frac{L_0}{\sqrt{S_0}}$$

$$L_0 = K \sqrt{S_0} \quad \text{اي ان} \quad \text{..... (11-10)}$$

حيث تمثل S_0 مساحة المقطع العرضي الأصلي في منطقة مدلول الطول.

يعرف هذا القانون بقانون باربا (Barba's Law) ويسمح بتناسب مدلول مقياس الطول مع مساحة المقطع العرضي لقطعة الاختبار. وقيمة "K" القياسية 5.65. وتعرف قطعة الاختبار التي تتطابق أبعادها مع العلاقة أعلاه بقطعة الاختبار التناسبية (proportional test piece).

وهكذا فلقطعة اختبار تناسبية مستديره ذات قطر أولي "d" فإن:

$$S_0 = \frac{\pi d^2}{4} = 0.7854 d^2$$

وبالتعويض في (10-11) أعلاه

$$L_0 = 5.65 \sqrt{S_0} = 5.65 \sqrt{0.785d^2} = 5.65 \times 0.8862 \times d$$

أو أن

$$L_0 = 5.0 d \quad \text{..... (10-12)}$$

ويعطي الجدول (10-6) بعض الأمثلة لأبعاد قطع اختبار تناسبية مستديرة وفق المواصفات البريطانية (British standards). ولا بد من ملاحظة أن الأقطار تم اختيارها لتعطي مساحات مقاطع عرضية ذات قيم عددية مناسبة لتبسيط حساب الأجهاد. ويعطي الجدول (10-7) أبعاد قطع اختبار مستطيلة المقطع غير تناسبية وفق المواصفة البريطانية المستخدمة لاختبار الصفائح (sheets) والشرائط (strips) والألواح (Plates) والأنابيب والمقاطع المسطحة.

وبغض النظر عن التوصيات في الجدول (10-7) فقد يستعمل مدلول مقياس طول مساو إلى $5.65 \sqrt{S_0}$. ويسمح بمدلول مقياس طول 50mm أو 200mm – بالتعاقب – لأي عرض ويحدد طول قطعة الاختبار بناء على ذلك.

جدول (6-10) قطع اختبار تناسبية مستديره وفق المواصفه البريطانيه.

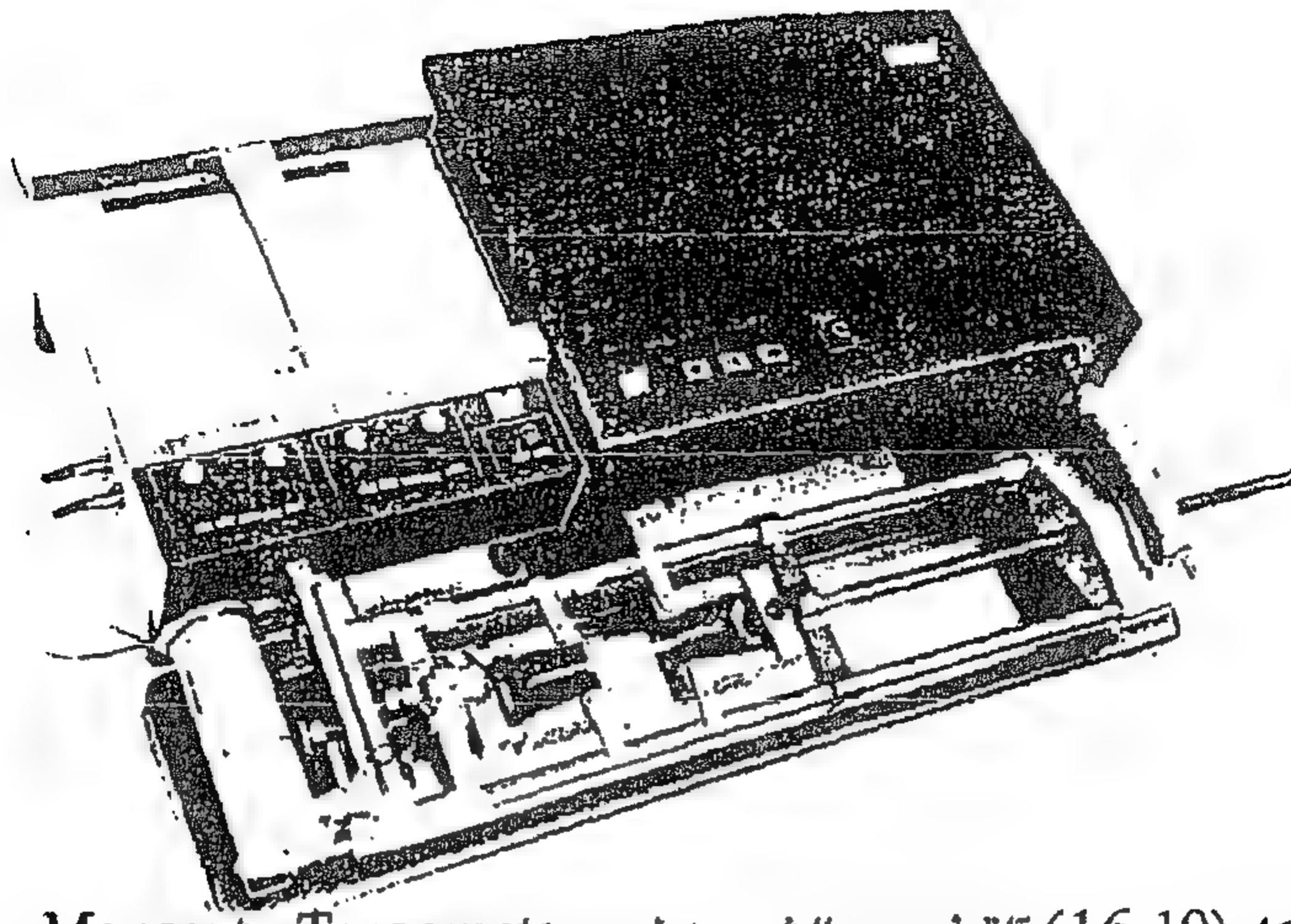
مدلول قياس الطول (L_0) mm	القطر (d) mm	مساحة المقطع العرضي (S_0) mm ²
125	25.23	500
80	16	200
54.5	11.30	100

جدول (7-10) قطع اختبار غير تناسبية مستطيلة وفق المواصفه البريطانيه.

العرض (b)mm	مدلول مقياس الطول (L_0)mm
40	200
25	100
12.5	50

وعند توفر عينه صغيره - فقط - من المعدن الذي تعرض للقص فيحضر منها قطعة اختبار مصغره (miniature). وقد تستعمل قطع اختبار مستديرة خاصة لها مدلول مقياس طول 25.25mm وقطر 5.05mm. وتعطي هذه القطع مساحة مقطع عرضي 20mm^2 ، وتستخدم اجهزة فحص من نوع (Monsanto Tensometer) لاختبارها (الشكل 10-16).

ويجب ان يكون محور الشد منطبقاً على محور قطعة الاختبار. وقد تكون نهايات المسكه (gripped ends) منبسطة (Plain) او مدببه (headed) او ملولبه (screwed) لتلائم ماسكات (holders) آلة الاختبار. ولمنع حدوث الكسر بالقرب من نهايات المسكة فإن لقطع الاختبار أنصاف اقطار انتقالية (transition radii)

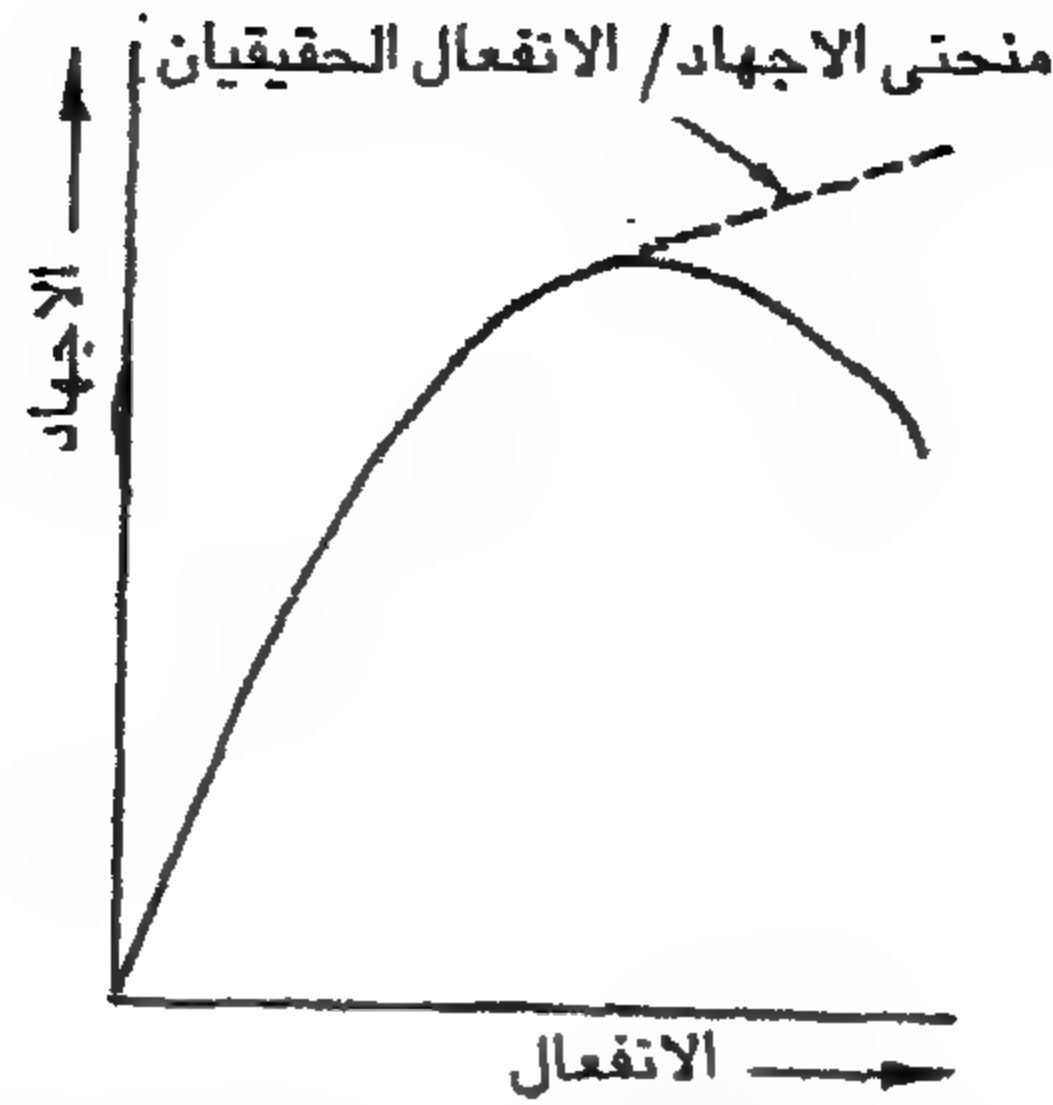


الشكل (10-16) آلة فحص الشد من نوع Monsanto Tensometer.

ما بين النهايات والطول الموازي وكما مبين في الشكل (10-15). وتستخدم قطع اختبار بأنصاف أقطار اكبر للمعادن المسبوكة من أنصاف أقطار قطع اختبار من المعادن المشكلة.

ويقاس الحمل عند ما يستطيل (يتمدد) المعدن ببطء حتى نقطة انكساره ويتم ايجاد مقاومة الشد بتقسيم أقصى حمل تتحمله مساحة المقطع العرضي الأصلي. ويسمى الاجهاد المحسوب لمساحة المقطع العرضي الذي افترض انه لا يتغير، بالإجهاد الاسمي (nominal stress). وتقل مساحة المقطع العرضي مع تمدد قطعة الاختبار لذلك إذا استخدمت مساحة المقطع العرضي الحقيقية عند اللحظة المطلوبة، سنحصل على الاجهاد الحقيقي (true stress). والإجهاد الحقيقي اعلى من الاجهاد الاسمي (الشكل 10-17). وغالباً ما تعتبر مقاومة الشد كقاعدة فحص معتمدة للمواد. ويتم الحصول - ايضاً - من اختبار الشد على نسبة الاستطالة ونسبة انخفاض المساحة.

ويُعبّر أحياناً عن نتائج اختبار الشد كما يلي:



الشكل (10-17) منحنى الاجهاد / الانفعال الحقيقي.

$$\text{مقاومة الشد} = \frac{\text{الحمل الأعظم}}{\text{مساحة المقطع العرضي الاصلية لمدلول مقياس الطول}} \quad (10-13) \dots\dots$$

وبالطريقة نفسها يمكن حساب مقاومة الخضوع وحد المرونة وحد التناسب (Limit of proportionality) بقسمة الاحمال عند هذه النقاط على مساحة المقطع العرضي الاصلية.

$$\text{الاستطالة} \% = \frac{\text{الزيادة في مدلول مقياس الطول}}{\text{مدلول مقياس الطول الاصلية}} \times 100 \quad (10-14) \dots\dots$$

$$= \frac{\text{مدلول مقياس الطول النهائي} - \text{مدلول مقياس الطول الاصلية}}{\text{مدلول مقياس الطول الاصلية}} \times 100$$

$$\text{النقصان في المساحة} \% = \frac{\text{النقصان في مساحة المقطع العرضي}}{\text{مساحة المقطع العرضي الاصلية}} \times 100 \quad (10-15) \dots\dots$$

$$= 100 \times \frac{\text{مساحة المقطع العرضي الاصلى - مساحة المقطع النهائى}}{\text{مساحة المقطع العرضي الاصلى}}$$

ان نسبة الاستطالة وانخفاض المساحة يعتبران مقياساً لمطيلية (ductility) المادة . وقد تكون الاستفادة من نسبة نقصان المساحة محدودة عند مفاضلتها مع الاستفادة من الاستطالة وذلك لان نسبة نقصان المساحة اقل اعتماداً على مدلول مقياس الطول المستخدم.

ويمكن تخمين مقاومة شد الفولاذ مع العلاقة التقريبية التالية :

$$\text{مقاومة الشد} = 3.4 \times \text{صلادة برينيل (HB)} \quad \text{.....(10-16)}$$

ولا تنطبق المعادلة اعلاه (10-16) على الفولاذ المشكل على البارد بشدة او الفولاذ الاوستنايتي.

٥-١٠ معامل الامان Factor of Safety :

يسعى المصمم المهندس الى ان يضمن ان الاجزاء لا تتكسر او تعاني من تغير دائم في الابعاد تحت الحمل المسلط. لذلك يجب ان لا يتجاوز الاجهاد المتكون (الناشئ) حد مرونة المادة. ومع ذلك، غالباً ما يستخدم لاغراض التصميم اجهاد الخضوع او اجهاد الصمود للمواد المطيلية (ductile materials). فضلاً عن ذلك ونظراً لامكانية ايجاد مقاومة شد المادة بطريقة تقليدية، فإن من المؤلف عملياً استعمال مقاومة الشد مع معامل امان كقاعدة للتصميم.

$$\text{اجهاد التشغيل المأمون} = \frac{\text{مقاومة الشد}}{\text{معامل الامان}} \quad \text{.....(10-17)}$$

ويعتمد معامل الامان المستخدم في اية حالة خاصة على ظروف العمل ويتأثر بما يلي:

أ- نوع التحميل ، اي ان كان مستقراً ام حركياً (static or dynamic).

ب- نوع المادة.

ج- احتمالية العيوب في المادة.

د- معدل احتمالية تلف (deterioration) المادة (بسبب البلى او التآكل).

هـ- مخاطر الفشل.

وقد يتراوح معامل الامان للفولاذ من حوالي (3) لحالات الحمل الساكن الى حوالي (15) للأحمال الصدمية (Shock Loads) . وربما يستعمل عامل امان أعلى (على سبيل المثال 20) عندما تكون هناك اجهادات متناوبه (alternating stresses) مع خطر كلال المعدن الذي يحدث لاحقاً (الفقرة 8-10).

٦-١ مقاومة الصدمة واختبارها Impact Strength & Testing

٦-١-١ الطاقة:

تدعى وحدة الطاقة وفقاً لنظام SI للوحدات بالـجول (J) ، وهو الشغل المنجز عندما تزيح قوة مقدارها نيوتن واحد مسافة متر واحد باتجاه القوة.

٦-١-٢ المتانة الهشاشيه والمطيلية Toughness, brittleness & ductility

تعرف المتانة بأنها قابلية المادة على امتصاص الطاقة والتشكيل تشكيلاً لدناً قبل الانكسار. وبما أن كمية التشوه اللدن الذي يحدث قبل الكسر هو مقياس لمطيلية المعدن، والإجهاد المطلوب لحدوث الكسر هو مقياس لمقاومته، فإن المتانة تقرر مع مقاومة ومطيلية المعدن. وتسمى المادة التي لا تبدي تشوهاً لدناً او تبدي تشوهاً لدناً ضئيلاً قبل الانكسار بالمادة الهشة. بينما تسمى المادة التي حدث فيها تشوهاً لدناً ملحوظاً قبل الكسر بالمادة المطيلية.

ويعتمد نوع الفشل الذي يحدث على عدة عوامل تشتمل على مايلي:

أ- طبيعة المادة وحالتها المعدنية (الميتالورجية).

ب- نوع الاجهاد.

ج- معدل الاجهاد rate of stressing

د- درجة الحرارة.

هـ- الوسط (المحيط) environment .

وهكذا فإن المواد المعدنية التي تتصرف بطريقة متينه عند تحميلها ببطء ربما تفشل بكسر هشى عند تحميلها بسرعة عالية. فعلى سبيل المثال عند اختبار عينتين من نفس الفولاذ عوملتا معاملة حرارية مختلفة اختباراً شديداً عادياً فإن لهما خواص متشابهة، ولكن قد يبديان خواص مختلفة تماماً عند اختبارهما تحت معدلات تحميل سريعة. وقد لا يعطي اختبار الشد المنجز ببطء اية نتائج متوقعة مثلما يعطي الاختبار المنجز بسرعه، لذلك فإن هناك حاجة لبعض الاختبارات الاضافية. ويتشابه تأثير نتائج التحميل السريع مع تلك التي يتم الحصول عليها إذا صنع حز في قطعة الاختبار.

٣-٦-١٠ اختبار الصدمة لقضيب فيه حز:

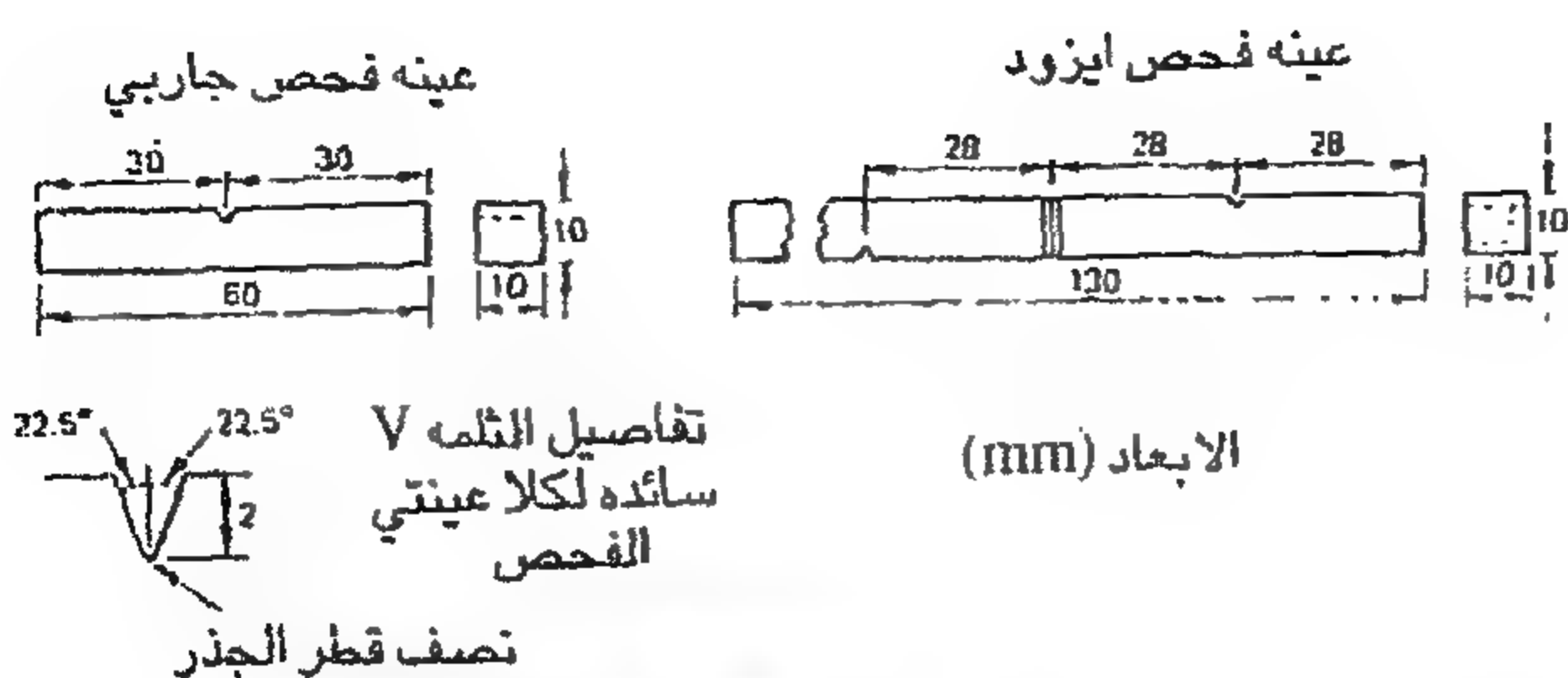
يستخدم اختبار الصدمة لقضيب فيه حز لقياس المتانة النسبية (relative toughness) لمادة تحت ظروف الاختبار. يتم صدم قضيب فيه حز ذو ابعاد محدده ببندول سريع الحركة، وتقاس الطاقة الممتصة لكسر قطعة الاختبار بالجول (Joule). ومن الملائم تسمية هذا النوع من الاختبار باختبار الصدمة لقضيب فيه حز وليس باختبار الصدمة فقط وذلك لأن الحز هو الأكثر اهمية وليس الصدمة. ويركز الحز الاجهادات، وربما تكون احدى المواد حساسة للحز اكثر من الاخرى.

(ومن الناحية التجريبية نادراً ما يكون توزيع الاجهادات ضمن العينة او الجزء منتظماً، وينتج عن بعض العوامل - كالشكل shape - مناطق معينة ذات اجهادات عالية مقارنة بالمناطق الاخرى مولده مواضع لتركز الاجهادات).

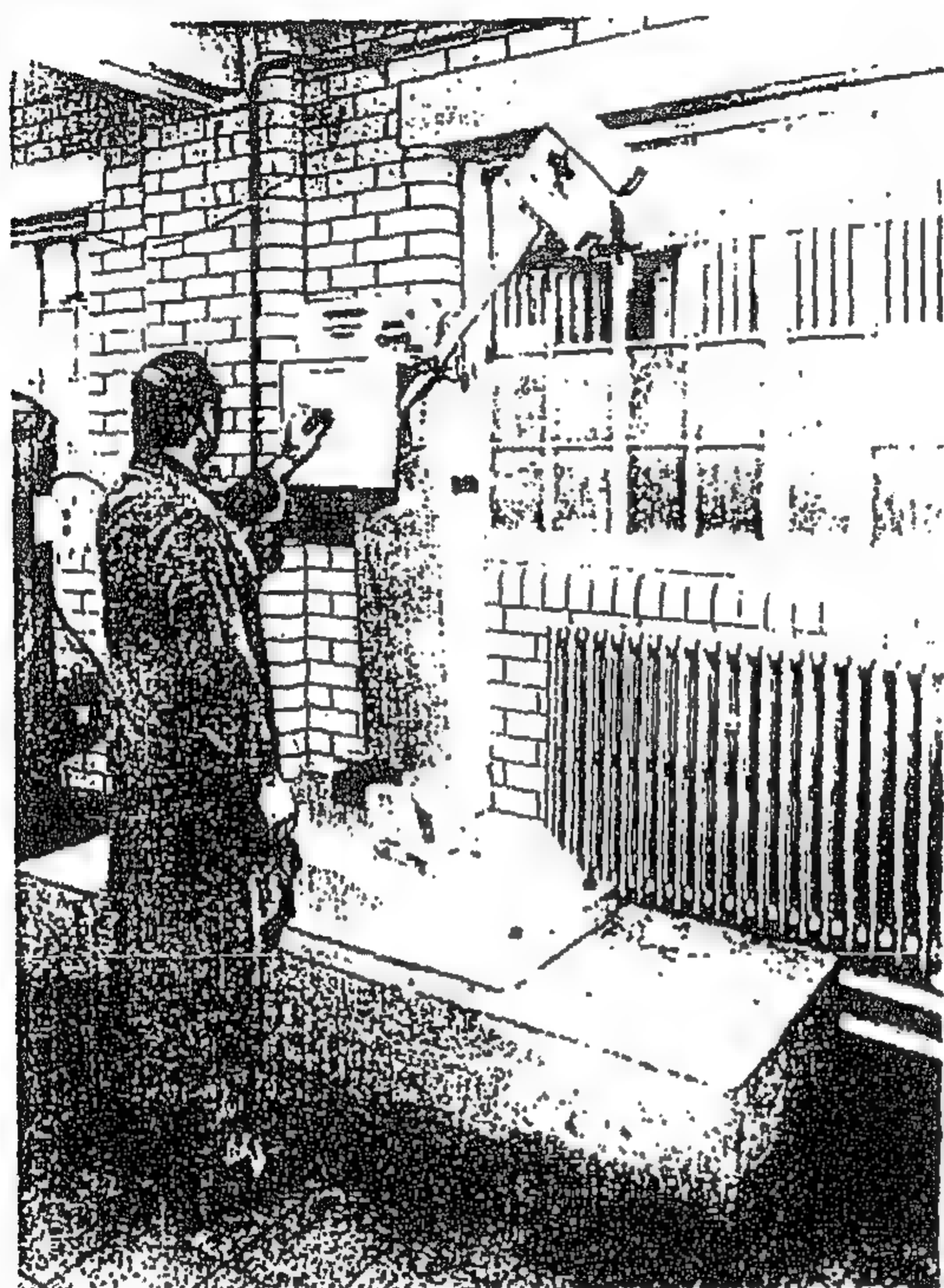
وتتأثر النتائج بمقدار كبير بنوع الحز (على شكل V أو U) (وَجِدَة الحز notch sharpness)، اذ يحتاج الحز الاكثر حدة الى كمية قليلة من الطاقة لحدوث الكسر. ومع ذلك فإن الحز في قطع الاختبار الكبيرة المقطع لايعطي النتائج ذاتها التي يتم الحصول عليها من قطع اختبار صغيرة المقطع (Small - section). ويمكن المقارنة ما بين النتائج التي يتم الحصول عليها من قطع اختبار متشابهة الابعاد.

ان درجة حرارة الاختبار هي أحد العوامل المهمة ايضاً فعند انخفاض درجة الحرارة تزداد مقاومة الخضوع وينتج عن ذلك نقصان ملحوظ في مطيلية بعض المواد، وإذا اشتمل الاختبار على تحميل سريع - ايضاً - فإن المواد المطيلية ربما تفشل بأسلوب هش . فعند معدلات تحميل منخفضة فإن الفولاذ منخفض الكربون يكون متيناً ومطيلياً عند درجات حرارية اعلى من حوالي 150°C - ، ولكن تحت حالات تحميل بالصدمة يحدث تحول من مكسر ليفي متين (Tough fibrous fracture) الى مكسر هش عند حوالي الصفر المئوي. وتعتمد درجة حرارة التحول على التكوين الكيماوي للفولاذ ايضاً. وبالنسبة لماده معينه تعزز درجة الحرارة المنخفضة ومعدل الانفعال العالي والحجم الحبيبي الكبير صفة الهشاشة.

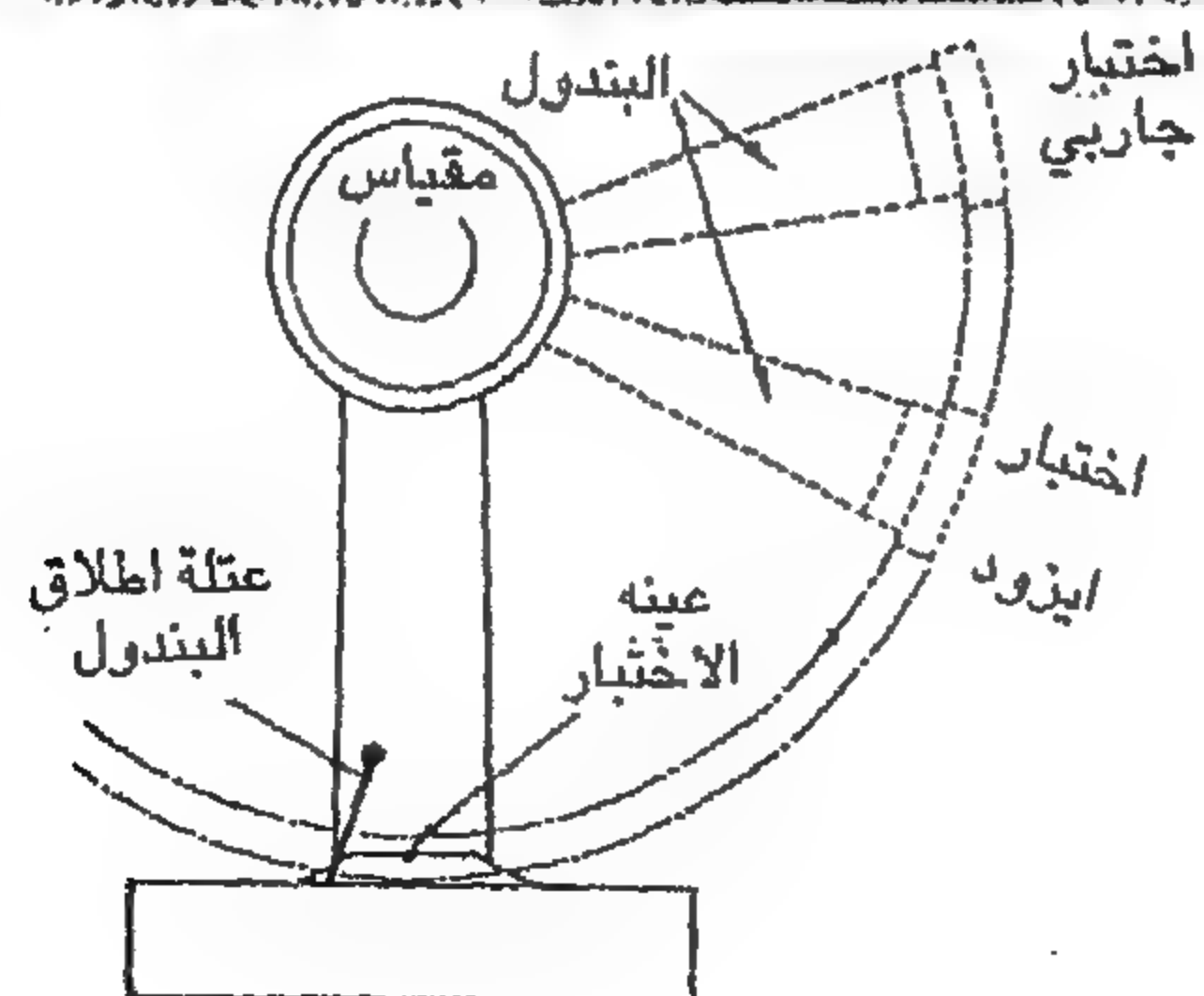
ولا تعتبر قيمة صدمة القضيب المحتوي على حز خاصية اساسية للماده، ولكن يستفاد منها في التنبؤ بسلوك الماده تحت حالات صدمية معينه وتكشف عن الميل للهشاشة التي لايمكن استظهارها باختبار الشد او اختبار الصلادة. واحدى الاستخدامات المهمة لهذا الاختبار هو تحديد هل ان المعاملة الحرارية للمادة تتم بصورة صحيحة ام لا. ولايعتد بنتيجة الصدمة لقضيب فيه حز لوحدھا بل تقرر بنتائج اختبارات اخرى كالشد والصلادة.



الشكل (18-10) عينات
ايزود وشاربي المحززه.



الشكل (19-10) آلة اختبار
الصدمه.



الشكل (20-10) مخطط
لإحدى آلات اختبار الصدمه
الشامل.

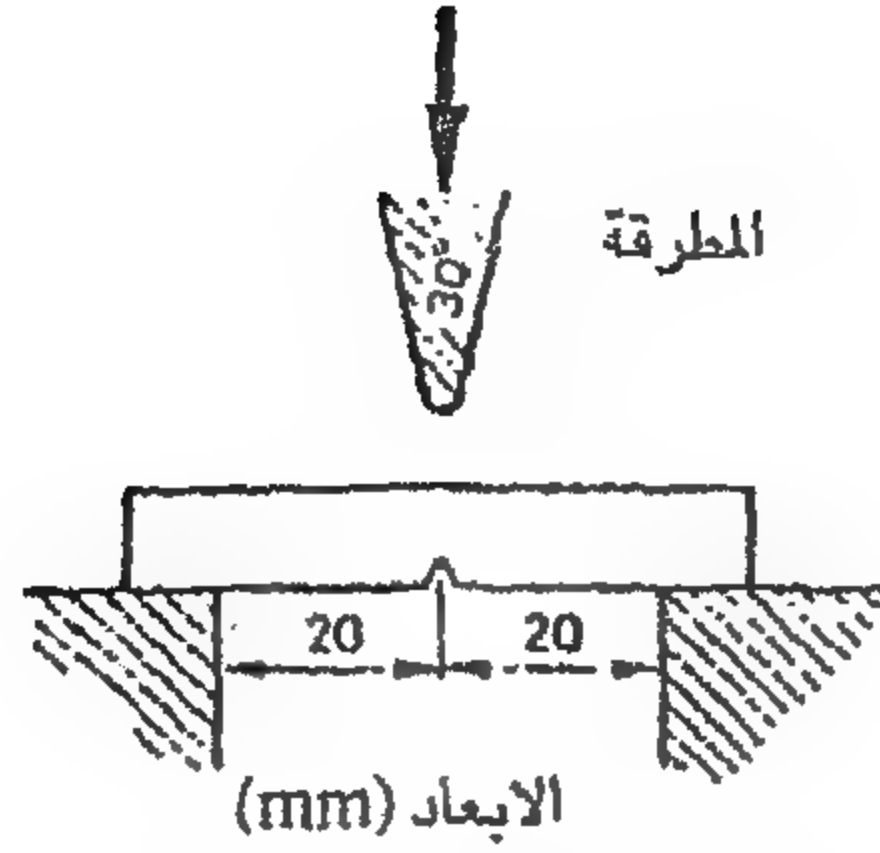
٤-٦-١٠ اختباري شاربي وأيزود بالصدمة Charpy & Izod impact test :

يشتمل كل من اختباري شاربي وأيزود على قياس الطاقة الممتصة في كسر قطعة اختبار فيها حز (الشكل 10-18) وذلك بضربها ببندول سريع الحركة. ويبين الشكل (10-19) آلة اختبار صدمه شامل الذي يمكن استخدامه لاختبار صدمة شاربي وأيزود . ويتم تحرير البندول في اختبار ايزود من الموضع الواطء ليعطي طاقة اصطدام (Striking energy) مقدارها 163 J او نحو ذلك بينما يحرر البندول في اختبار شاربي من أعلى موضع ليعطي طاقة اصطدام مقدارها 250 J تقريباً وحسب التصميم . وقد صممت آلة الاختبار بحيث يهمل اي فقدان للطاقة نتيجة للإهتزازات في هيكلها اثناء الفحص . ويجب ربط الآلة باحكام بمسامير ملوليه مثبتة بأرضية كونكريته لا يقل سمكها عن 15cm لأن اي افتقار في الجساءة عند تثبيت الآلة سيؤثر على مقدار الطاقة الممتصة .

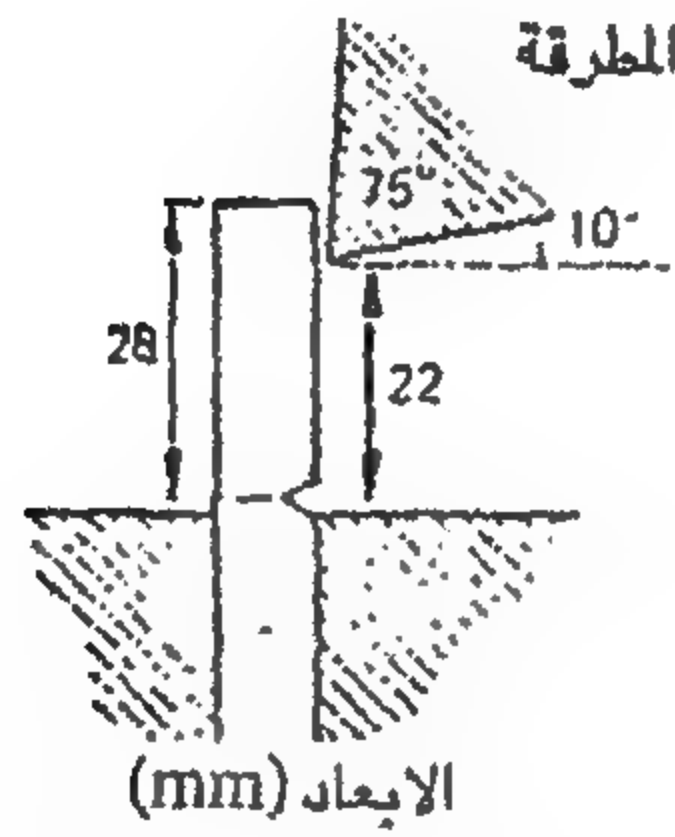
يبين الشكل (10-20) عمل آلة الاختبار، فعند تحرير البندول سيسقط تحت تأثير الجاذبية ويضطدم بقطعة الاختبار عند اوطأ نقطة من مساره وبطاقة حركية عالية. تكسر هذه الطاقة قطعة الاختبار، وبما أن قليل من الطاقة يتم امتصاصه في الكسر، فإن البندول سوف لن يرتفع الى نفس الارتفاع من الجانب الآخر. والفرق في ارتفاع البندول يمثل مقياس للطاقة المستنفذة في كسر قطعة الاختبار. ان المؤشر الذي يقيس الارتفاع الاخير للبندول أثناء الجركة مدرج بوحدات الجول وبذلك يمكن قراءة الطاقة الممتصة في الكسر مباشرة من على المؤشر.

تثبت قطعة الاختبار في طريقة شاربي من طرفيها مع جعل الحز عند المنتصف وتحرر المطرقة لتكون الصدمة مباشرة خلف الحز (الشكل 10-21) .

وتثبت قطعة الاختبار في طريقة ايزود عمودياً بواسطة ملزمة (Vice) بحيث يكون مستوى الحز عند حافة الملزمة. وتحرر مطرقة الصدمة من نفس جانب الحز وعند ارتفاع ثابت اعلى من الحز (الشكل 10-22).



الشكل (10-21) اختبار جاريبي.



الشكل (10-22) اختبار ايزود.

وبما ان عينة اختبار شاربي لا تحتاج للتثبيت في موضعها (كما هو الحال في اختبار ايزود) فإنها تستخدم بسهولة اكبر لاختبار العينات عند درجات حرارية مختلفة، وتبعاً لذلك حل اختبار شاربي ، حالياً، وبصورة كبيرة محل اختبار ايزود. ويمكن الحصول على معلومات اضافية عن اختبار الصدمة لقضيب فيه حزم من المقاييس البريطانية BS 131 القسم الأول الى الخامس.

٧-١٠ الزحف Creep :

يشير مصطلح الزحف الى التشويه اللدن البطيء الذي يحدث مع التحميل الطويل وعند درجات حراريه عاليه عادة (بين 0.3 الى $0.4 T_m$ للمعادن و 0.4 الى $0.5 T_m$ للخزفيات، حيث تمثل T_m درجة الحرارة المطلقة لانصهار تلك المادة).

وتعاني المعادن اللينه (كالرصاص) من الزحف عند درجة حرارة الغرفة، ولكن يظهر الزحف في معظم المواد المعدنية عند الدرجات الحرارية العاليه. وبصوره عامه، تبدي المواد ذات درجات الانصهار العاليه افضل مقاومة للزحف. وربما ينتج عن هذا التشويه التدريجي وعلى مدى فترة زمنية طويلة الكسر عند اجهادات اقل من مقاومة المادة الاعتيادية. لذلك من الضروري عند تخمين سلوك معدن تحت الاجهاد وعند درجات حراريه عاليه الاخذ بنظر الاعتبار عامل الزمن لعدم توقف الانفعال بعد تسليط الحمل مباشرة بل يستمر مع الزمن، وقد يؤدي في النهاية الى الكسر البلوري البيني (Crystalline fracture).

وقد يحدث الزحف تحت شد ثابت (Static tension) أو تحت الانضغاط أو الثني أو اللي أو تحت الاجهاد القصي إلا أنه غالباً ماتم دراسته تحت حالات الشد والحمل الثابت (constant Load). ان الزحف مهم في الاستخدامات التالية:

أ- المعادن اللينه المستخدمة عند درجات حراريه قريبه من درجة حرارة الغرفة كأنابيب الرصاص ومعادن المرتكزات البيضاء (white metal bearings).

ب- الوحدات الصناعية العامله عند درجات حراريه عاليه كمعدات الافران والتوربينات الغازية والوحدات الصناعية والكيماوية والبخارية.

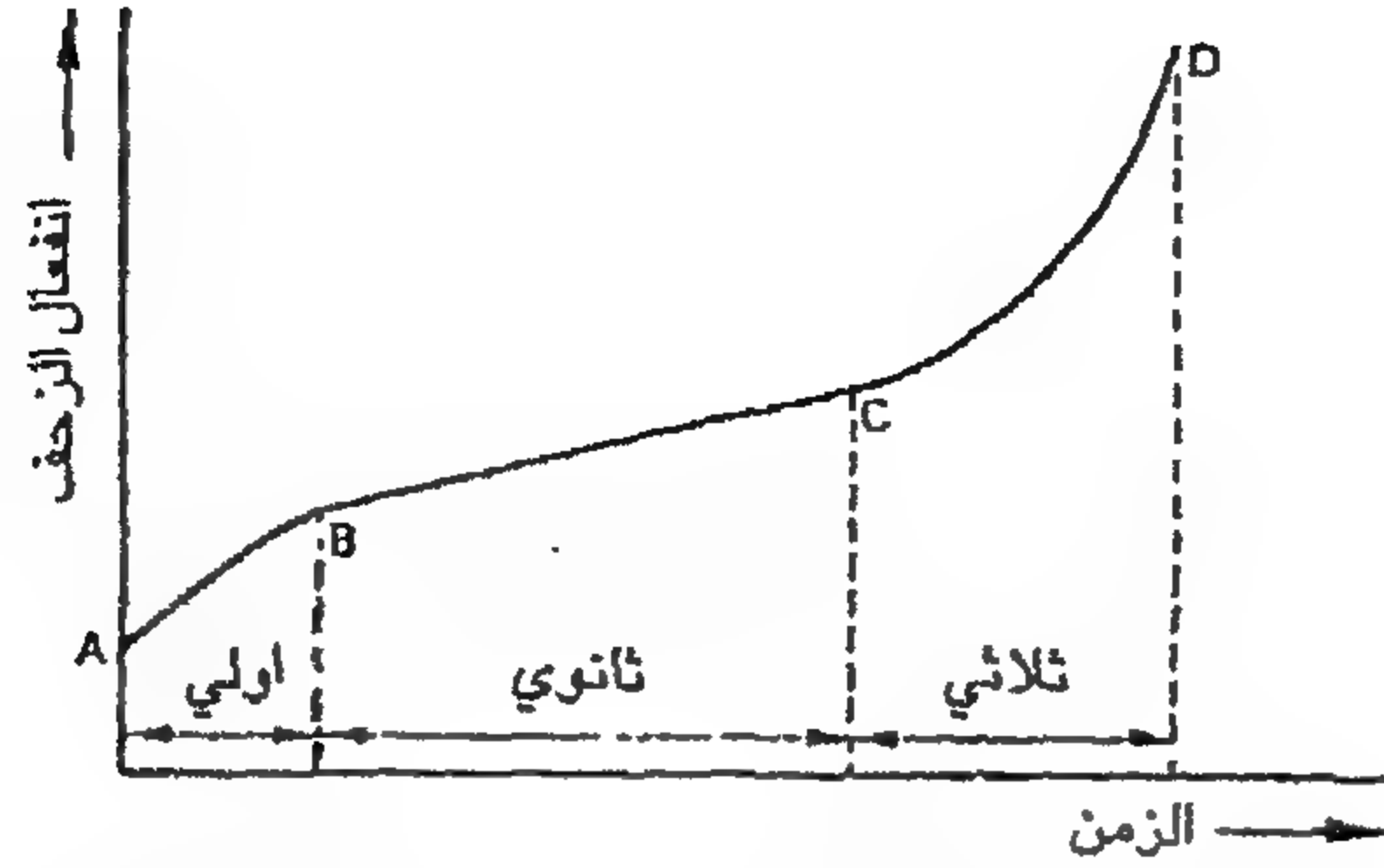
وعند تصميم وحده صناعية للعمل بكفاءة عند درجات حراريه اعلى من درجات حرارة الجو، فلا بد من الاخذ بالإعتبار اقصى انفعال مسموح به وعواقب الكسر والعمر المتوقع للوحده الصناعية. وتعتمد هذه الاعتبارات وبشكل كبير على نوع الجزء وظروف عمله.

ويمكن دراسة الزحف الناتج عن حمل شد ثابت بقياس الاستطالة الدائمية بعد فترات زمنية مختلفة لقطع الاختبار و عند درجة حراريه ثابتة. وعند رسم انفعال الزحف مع الزمن نحصل على منحنٍ كالذي مبين في الشكل (10-23). فبعد الاستطالة اللحظية الابتدائية (Initial instantaneous extension) يمكن ملاحظة ان المنحنى يتكون من ثلاثة اجزاء.

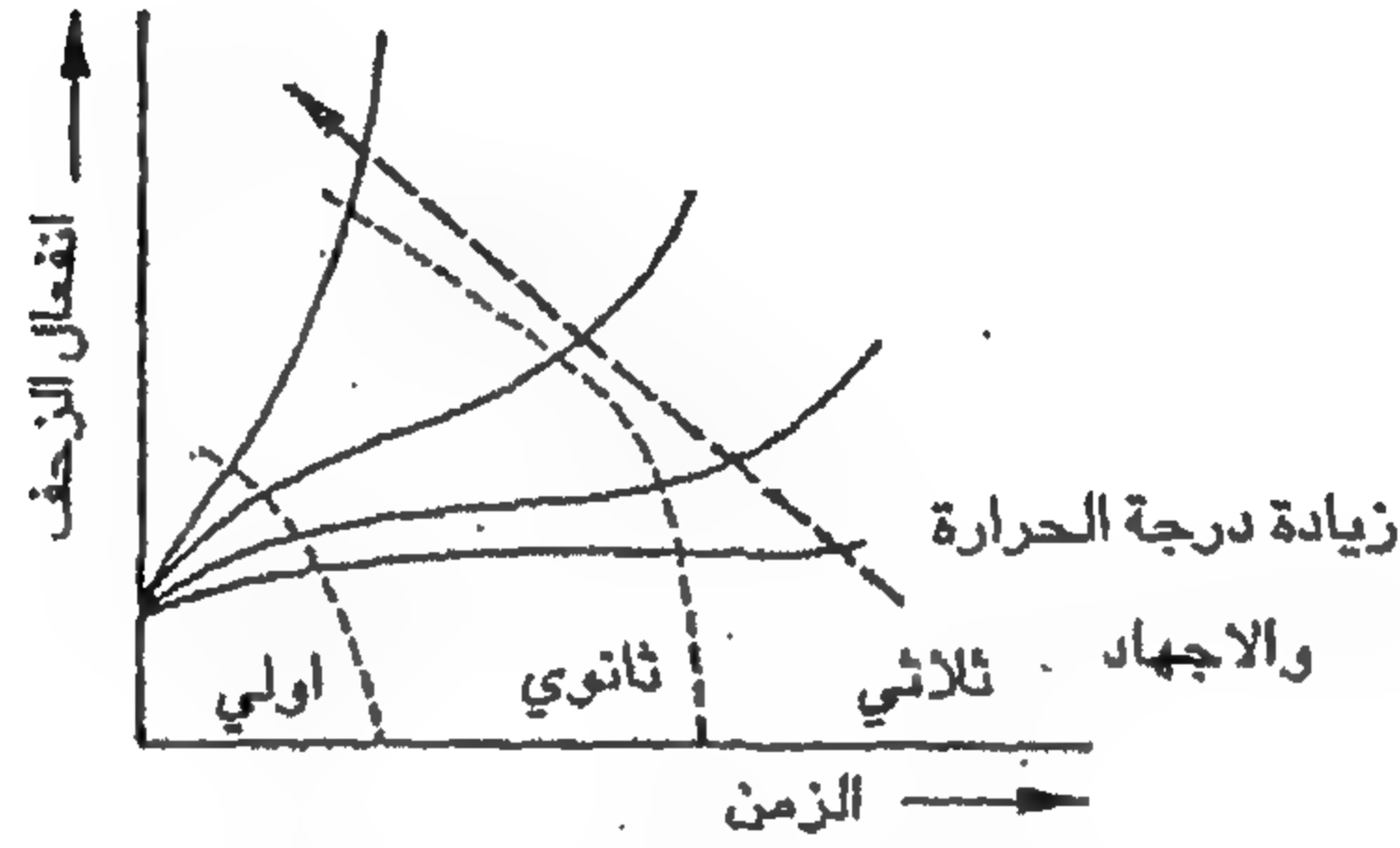
أ- المرحلة الابتدائية (AB) والتي يرافق التشويه فيها الاصلاح الانفعالي، والذي يقلل وبسرعة معدل الانفعال.

ب- المرحلة الثانية (BC) والتي يكون فيها معدل الانفعال ثابتاً تقريباً. وهذه الحالة المستقرة هي اهم جزء في المنحنى حيث يعطي العمر التخميني للجزء.

ج- المرحلة الثالثة (CD) والتي يزداد فيها معدل الانفعال بسرعة نتيجة للتخسر الموضعي لقطعة الاختبار او تكوّن الفجوات الداخليه (internal cavities) مما يزيد في الاجهاد المؤثر وحدوث الكسر عند نقطة (D). ولا يمكن في العديد من الحالات تميز المراحل الثلاثة في المنحنى بوضوح. وللحصول على صورة متكاملة لخواص زحف المادة، فمن الضروري الحصول على عدة منحنيات للزحف ولمدى من الاجهادات والدرجات الحراريه. ويظهر من بعض المنحنيات (الشكل 10-24) انه مع تناقص الاجهاد المسلط تتناقص المرحله الابتدائية وتمتد المرحله الثانية بينما تميل الاستطالة خلال المرحله الثالثة الى الزيادة . اما عند تسليط اجهاد منخفض جداً فلا تظهر مرحلة الزحف الثالثة حتى بعد فترة عمل طويلة.



الشكل (10-23) منحنى الزحف يبين المراحل الثلاثة للزحف.



الشكل (10-24) انواع منحنيات الزحف.

١٠-٧-١ اختبار الزحف:

تستخدم اغلب اختبارات الزحف اجهادات شديدة وقطع اختبار شديده. ويستغرق اختبار الشد وقتاً طويلاً، وتحتوي مختبرات اختبار الزحف غالباً على مئات من مكائن الاختبار التي تستعمل باستمرار. ويمكن ان تستوعب المكائن عدة قطع اختبار. وتستخدم اوزان ثابتة ينقل تأثيرها عبر عتلات لتعطي حملاً ثابتاً. وتوضع قطع الاختبار داخل افران المقاومة الكهربائية من النوع الانبوبي التي تحافظ على درجة حرارة الاختبار بدقة ولفترة طويلة من الزمن. ومن الضروري

الحفاظ على انتظام توزيع درجة الحرارة على طول مدلول مقياس الطول لقطعة الاختبار. ولا بد من الحفاظ على الحرارة ضمن الحدود المبينه في المواصفه البريطانيه BS 3500 وكما يلي (استخدام مزدوج حراري من البلاتين / البلاتين - 13% روديوم).

لحد 600°C ضمن مدى $\pm 3^{\circ}\text{C}$

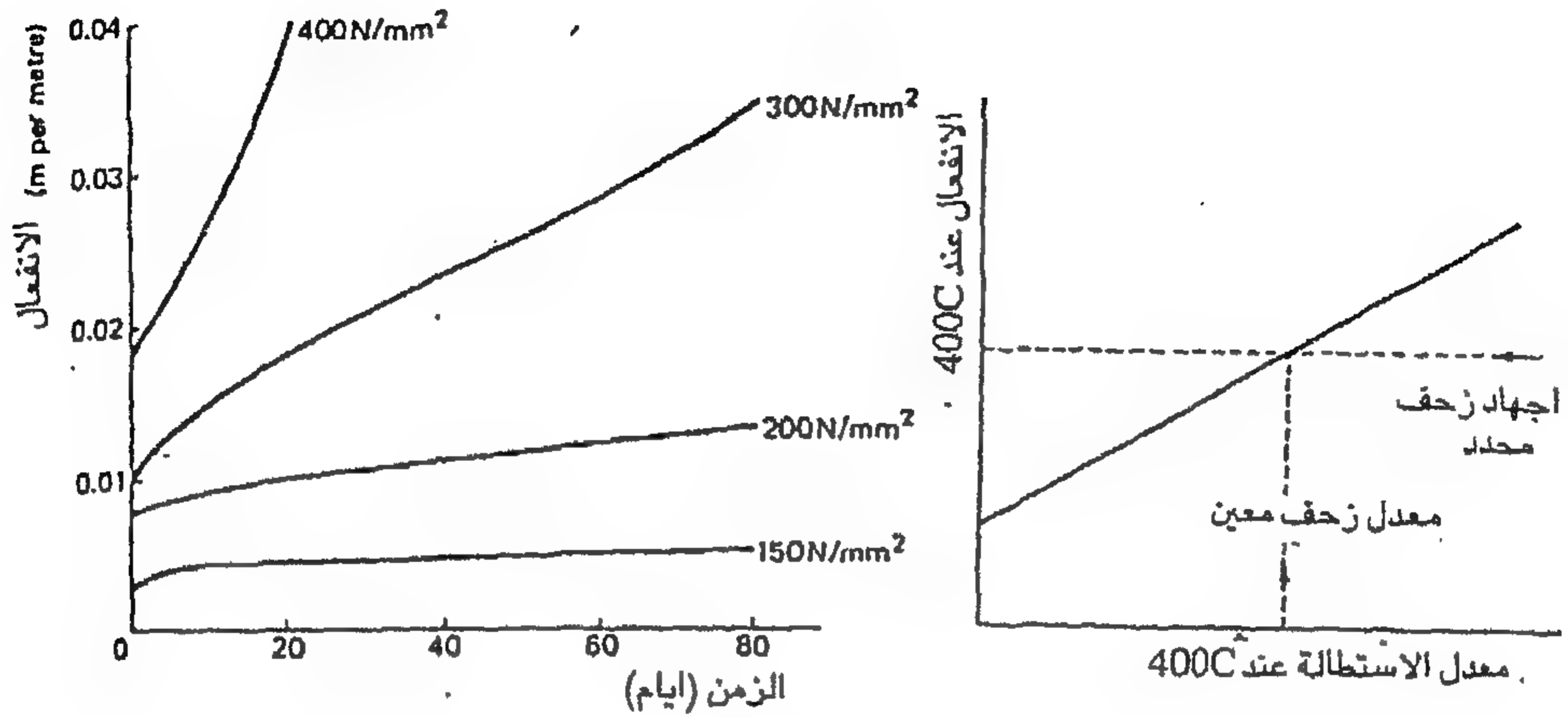
$600 - 800^{\circ}\text{C}$ ضمن مدى $\pm 4^{\circ}\text{C}$

$800 - 1000^{\circ}\text{C}$ ضمن مدى $\pm 6^{\circ}\text{C}$.

ويستخدم للاختبارات الطويلة مقياس استطالة (extensometer) عالي الحساسية قادر على قياس معدل زحف مقداره 1×10^{-8} بالساعة.

وتلاحظ قراءات مقياس الاستطالة عند فترات زمنية منتظمة حتى الحصول على التشوه المطلوب او الوصول الى انكسار العينات ، اعتماداً على الغاية من الاختبار هل هو ايجاد معدل الزحف او ايجاد الانفعال الكلي للزحف.

وقد تستعمل سلسلة من اختبارات الانفعال - الزمن ، ذات اجهادات مختلفة وربما تسلط عند درجة حراره معينه، ويضمن اجهاد الزحف المحدود (Limiting creep stress) لحالات معينه ذات معدل زحف صغير من منحنى الاجهاد - معدل التمدد (شكل 10-25).



الشكل (10-25)

(a) منحنى الزحف لفولاذ ذو نسبة كربون 0.4% عند 400°C.
(b) تعيين اجهاد الزحف المحدود.

ان الاختبار الطويل مهم للحصول على معلومات تصميمية يعول عليها لتخمين السلوك المحتمل للمادة عند العمل لعدة سنوات. وربما يظهر الخطأ من استقراء نتائج الاختبارات قصيرة الزمن التي قد لاتعطي كافة التغيرات المحتملة في البنية (كإندماج جسيمات الكربيد مثلاً).

ويستفاد من الاختبارات القصيرة الزمن في تطوير السبائك وفي السيطرة على الانتاج. وقد تستعمل ايضاً في الحصول على بيانات عامه عن سلوك المادة اضافة الى مقارنة اوليه ما بين المواد المختلفة . ان الاختبار المألوف هو تحديد اجهاد الخضوع الزمني (وهو الاجهاد الذي ينتج عنه مقدار معين من الزحف عند زمن ثابت، كثلاثة ايام على سبيل المثال). والاختبار القصير الاخر هو اختبار الاجهاد -

التهشم (stress - rupture test) والمستخدم لتحديد الزمن حتى التهشم تحت حالات معينة من درجة الحرارة والاجهاد مع قياس الانفعال التقريبي باستعمال محدد قياس ذي مقياس قرصي (dial gauge) اثناء الاختبار . ويستفاد من هذا الاختبار عند السماح بحدوث تشويه الزحف دون السماح بالكسر . وقد يعبر عن النتائج بالاجهاد الاقل الذي سيحدث عنده التهشم في وقت معين (على سبيل المثال 1000 hr) .

٨-١٠ الكلال Fatigue :

يستخدم مصطلح الكلال لبيان فشل المواد المعدنية تحت احمال متغيره متكررة . فإذا عُرِضت مادة الى اجهاد متكرر او متغير دورياً ، فإنها ربما تتعرض في النهاية الى الفشل حتى ولو كان اقصى اجهاد مسلط يقل بكثير عن الاجهاد اللازم لحدوث الكسر في حالة الاختبار المستقر (static test) قصير الامد . ويشار الى هذا النوع من الفشل بفشل الكلال وللمكسر الناتج مظهر مميز . وتتعرض العديد من الاجزاء الهندسية الى احمال متغيره (كما في المحركات ذات المكابس ان يتعرض ذراع التوصيل الى السحب و الدفع باستمرار) ، ويكون فشلها ناتجاً عن الكلال - غالباً - وليس من الضروري ان تتعرض المادة بأكملها الى اجهادات متغيره ، ويحدث فشل الكلال غالباً عند المنطقة السطحية ذات الإجهاد الاكبر . وربما يأخذ تكرار الاجهاد شكل شد متكرر او ضغط او صدمه او ليّ (Twisting) او تناوب الشد والانضغاط او تناوب الثني والليّ .

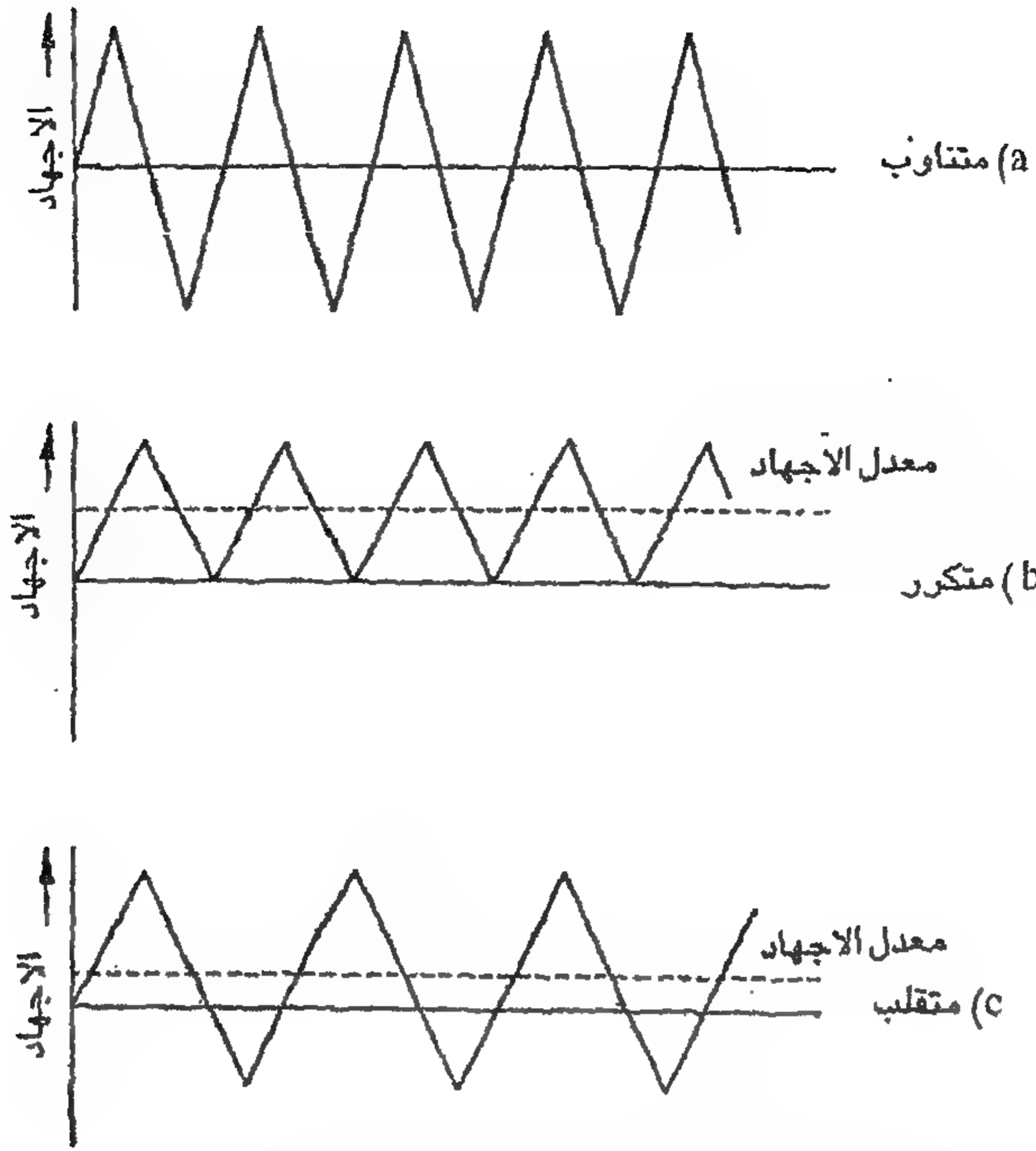
ويسمى التغير المتكرر في اجهادات الكلال دورة الاجهاد (stress cycle) (المصطلحات المستخدمة اضافة الى دورات الاجهاد معرفة في المواصفة البريطانية BS 3518) . ويمكن تصنيف انواع دورات الاجهاد التي ربما تتعرض اليها المادة الى المتناوبه (alternating) والمتكررة (repeating) او المتقلبة (fluctuation) (الشكل

10-26) . ففي دورة الاجهاد المتناوب فإن قيمة متوسط الاجهاد تساوي صفراً .
وتتباين قيمة دورة الاجهاد المتكرر من صفر الى اقصى قيمة له، بينما لا يكون الاجهاد
الادنى او متوسط الاجهاد مساوياً للصفر في دورة الاجهاد المتقلب . و ربما يتعرض
الجزء الى حمل ثابت اضافي إضافة الى الحمل المتقلب (fluctuating Load) .

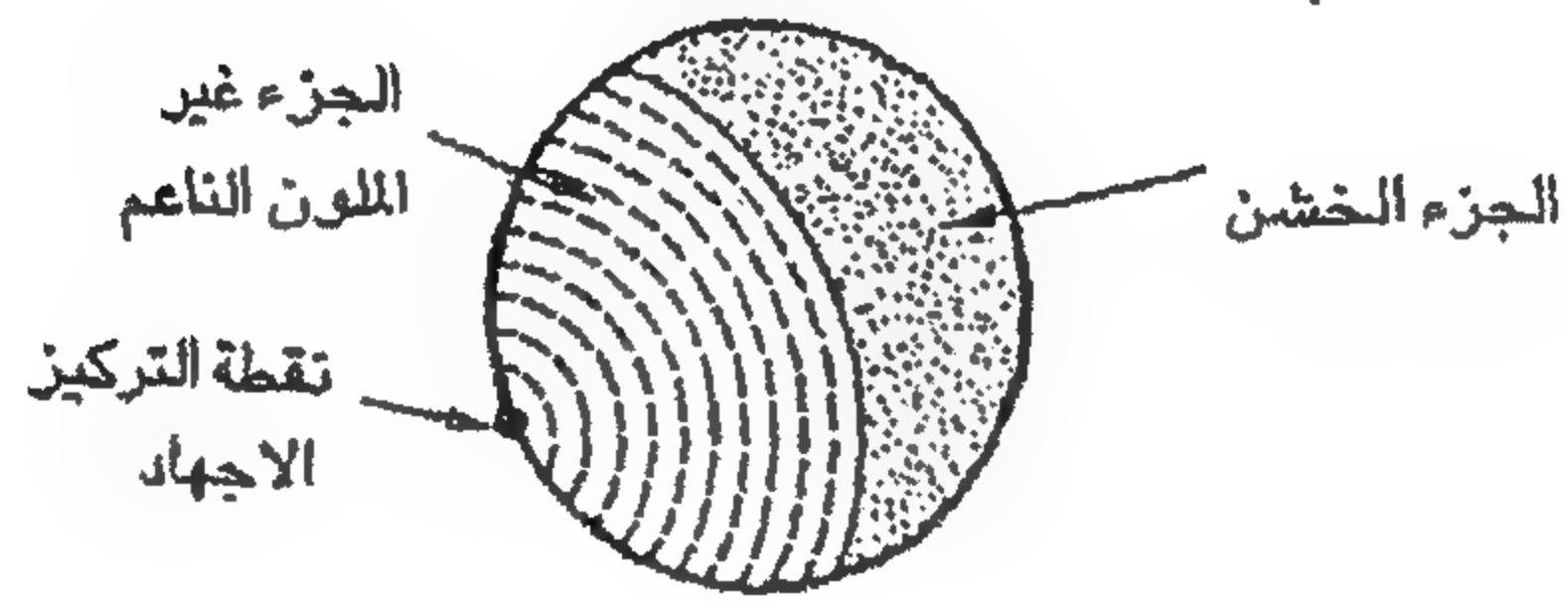
ويبدأ فشل الكلال بتكون شق صغير يكاد يكون دائماً بالقرب من السطح . ويمتد
هذا الشق ببطء الى داخل المادة كشق ضيق حتى يصبح المقطع العرضي غير
المكسور من العينه او الجزء غير قادر على تحمل الحمل طويلاً . وتبدو آلية تكون
شق الكلال - ايضاً - مشابهة لآلية تكوّن الشقوق في المواد الهشة إلا أنها في
الحقيقة تنشأ بوساطة التشويه اللدن كما يتبين ذلك من ظهور أشرطة الانزلاق
(Slip bands) على سطح المادة اثناء الاجهاد الدوري (Cyclic stressing) .

ويمكن تمييز الكسر النهائي الناتج عن فشل الكلال بسهولة لان سطح الكسر
يتصف بمنطقتين واضحتين (الشكل 10-27) ، احدى هاتين المنطقتين ناعمة
(smooth) وغير ملونه ولها علامات تموج (rippled markings) تشبه صدفة
المحار والاخرى لماعة ذات مظهر بلوري او ليفي . ويبين الجزء الناعم التقدم
التدريجي للشق من نقطة ما من نقاط تركيز الاجهاد . وهذه النقطة عادة توجد عند
السطح او بالقرب منه اما كحز ناتج عن عدم انتظام السطح (خدش او زوايا حاده) او
كعيوب البنية (كالمكتنفات او الفجوات) ، وتنكسر المنطقة الاخرى والتي تبدو خشنة
بفعل فشل شدي بسيط ، اي اما بكسر لدن او بكسر هش .

ولا يمكن تمييز هذا الاختلاف في المظهر ما بين هاتين المنطقتين في مواد المعدنيه
الاكثر هشاشيه عند فشلها بالكلال .



الشكل (10-26) انواع دورات الاجهاد.



الشكل (10-27) كسر نموذجي السبب هو الكلال.

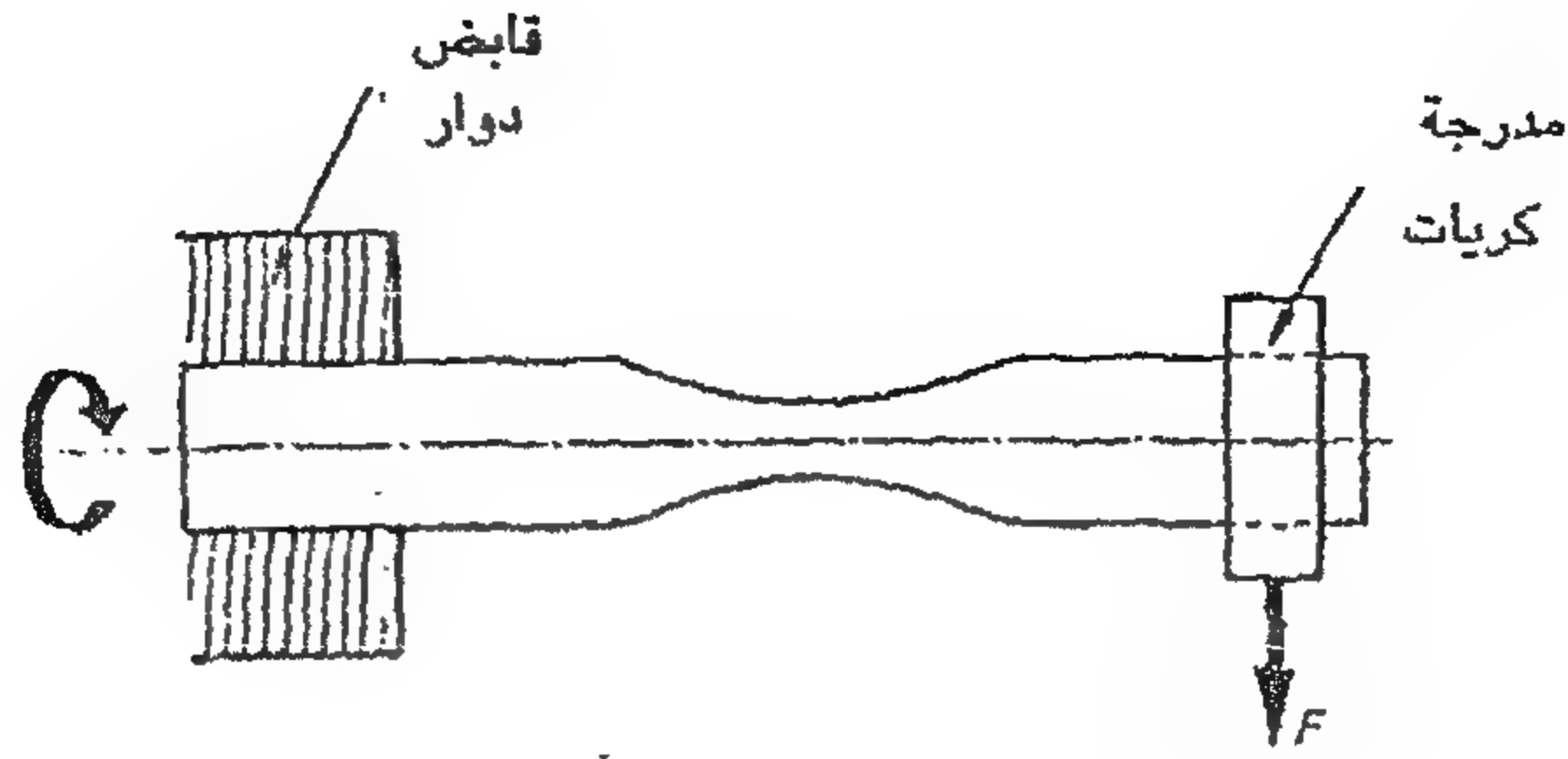
١-٨-١ اختبار الكلال:

لا بد من اختيار قطع اختبار كبيره الحجم تحت حالات قريية قدر الامكان من تلك الموجودة في الخدمة لضمان الارتباط بالأداء أثناء الخدمة ، ومع ذلك يمكن

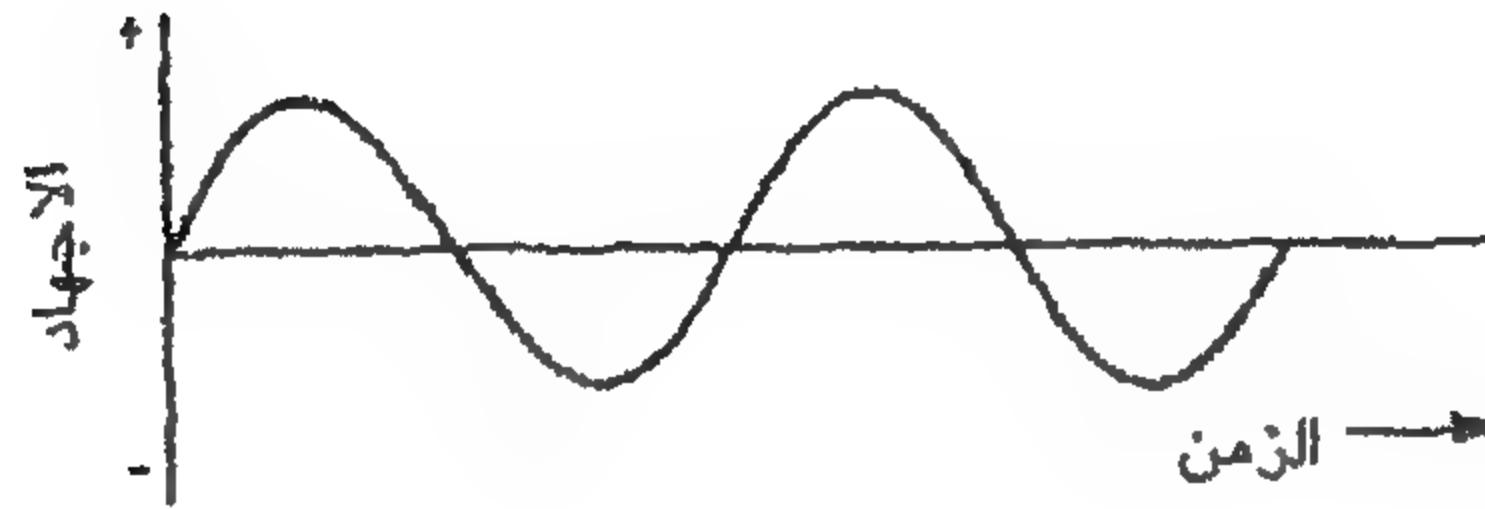
الحصول على بعض المعلومات الأساسية المتعلقة بخواص الكلال من اختبارات مختبرية بسيطة.

ان عمر الكلال او التحمل (endurance) هو عدد دورات الاجهاد حتى الفشل، ويعطى عادة ككسر عشري او عدد صحيح مضروباً بـ 10^6 . وحد الكلال (fatigue limit) هو مقدار الاجهاد الذي ربما تتحمل المادة مالا نهائية من دورات الاجهاد عند قيم اقل منه. ولا يمكن للعديد من المواد وعند مختلف الاوساط بلوغ حدود كلال واضحة.

ويشتمل اختبار الكلال عادة على استعمال دورة اجهاد متناوبه ذات متوسط اجهاد يبلغ صفراً. وقد تتعرض قطعة الاختبار الى شد او ضغط محوري متناوب ، او يتم الاختبار باستخدام آلة اختبار فوهرل (wohler fatigue testing machine) (الشكل 10-28). وربما يتعرض الجزء الى ثني دوراني (rotory bending) . ويتم تحميل قطعة الاختبار ذات مقطع عرضي دائري كعارضة مثبتة من طرف واحد (حيد) (cantilever). وتدار نهاية العارضه باستخدام محرك كهربائي. ويسلط الحمل الساكن (dead loading) على قطعة الاختبار من خلال مدرجه كريات (ball race) وعند دوران قطعة الاختبار فإن هناك تغيراً جيبياً (Sinusoidal) في الاجهاد (الشكل 10-29) الذي تكون أقصى قيمة له عند السطح و صفراً عند المركز. وعند دوران قطعة الاختبار 180 فإن القوى المؤثرة "F" عند نقطة على قطعة الاختبار تنخفض الى الصفر ومن ثم تزداد الى قيمة القوة "F" وباتجاه معاكس ، لذلك فإن الاجهاد عند نقطة على سطح قطعة الاختبار سيتغير من الشد الى الصفر ثم الى الانضغاط.



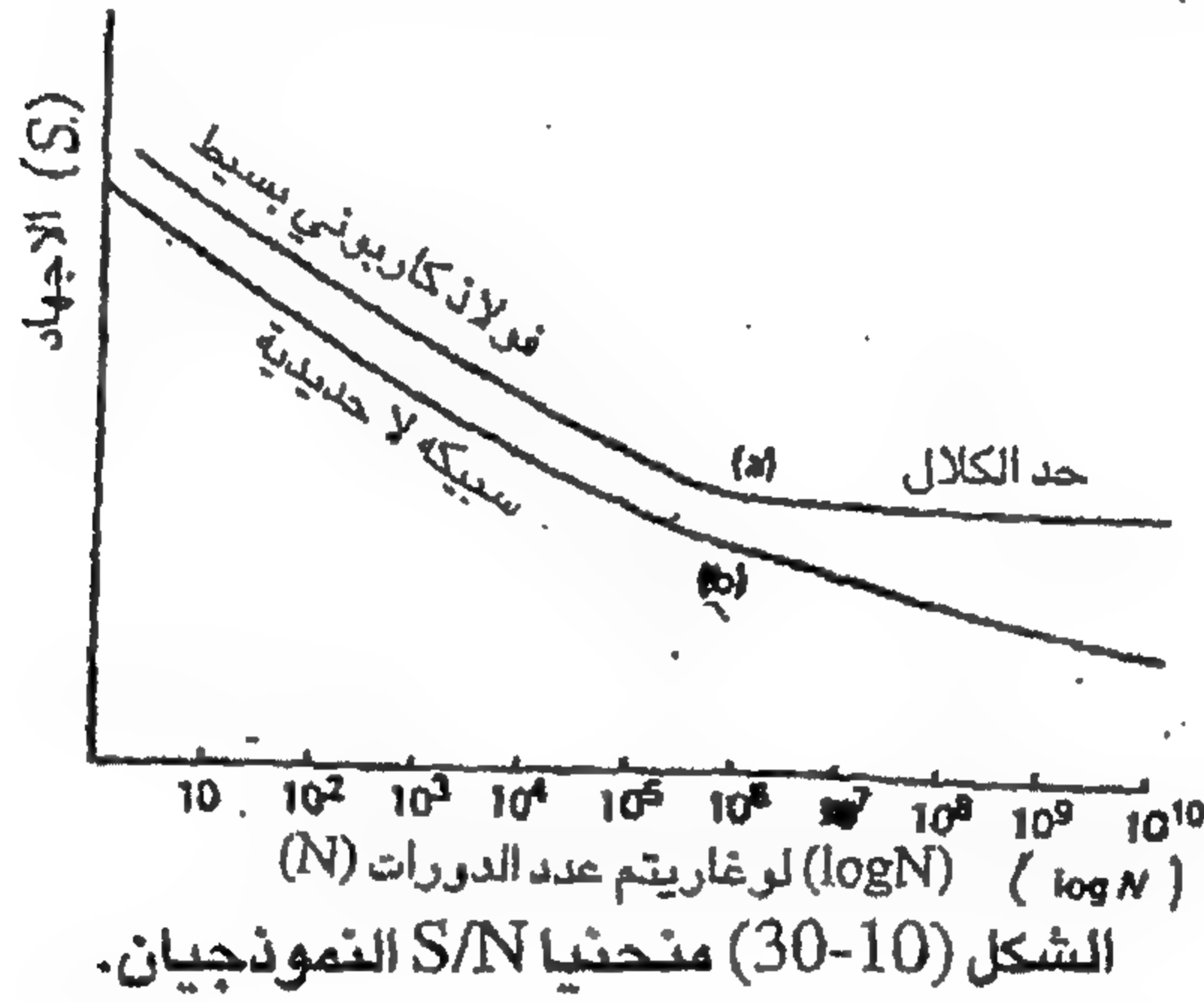
الشكل (10-28) أساس اختبار فوهرلر (wohler) الدوراني للكلال.



الشكل (10-29) التغير الحبيبي للإجهاد.

ولتعيين حد الكلال، فإن عدداً من قطع الاختبار للمادة سيتم اختبارها بهذه الطريقة وعند قيمة مختلفة للقوة "F" لكل عينة، حتى يحدث الفشل أو حتى يصل عدد انقلابات الاجهاد من شدي الى انضغاطي وبالعكس الى 2×10^7 مره. ثم يتم رسم اقصى اجهاد (S) من هذه النتائج مع $\log N$ حيث تمثل "N" عدد مرات الانقلاب . ومن هذا المنحنى يمكن استخراج حد التحمل أو حد الكلال وهو أكبر اجهاد يمكن ان يتحمل النموذج عنده مالا نهائية من دورات الانقلاب حيث يصبح

المنحنى افقياً عند هذا الاجهاد (الشكل 10-30). ويبيدي معظم انواع الفولاذ حد كلال واضح (كما في المنحنى (a) من الشكل 10-30) والذي يبلغ حوالي نصف مقاومة الشد المحدد في اختبار الشد. ولا تظهر العديد من المعادن اللاحديدية حد كلال واضح، اي ان منحنى S-N يميل بالتدرج في الانحناء باتجاه المحور الافقي (كما في المنحنى (b) من الشكل 10-30). ويبلغ معدل الانقلاب الدوري في اختبار الكلال حوالي 120-150 هيرتز (Hz)، وتستخدم احياناً معدلات أعلى لغرض إكمال 10^7 دوره في عدة ساعات. ولكن تميل هذه التجارب لاعطاء نتائج أعلى لقيم حد الكلال من النتائج التي يتم الحصول عليها من اختبارات ذات تردد واطئ.



٢-٨-١٠ العوامل المؤثرة على مقاومة الكلال:

يتأثر فشل الكلال بالعديد من العوامل الهندسية والميتالورجية والتي تشمل:

١- متوسط الاجهاد mean stress :

تشتمل الاستخدامات الهندسية الرئيسية على متوسط الاجهاد والذي لا يساوي صفراً، وهذا مغاير للحالات الموجودة، عادة، في اختبار الكلال وبزيادة متوسط الاجهاد في الشد ينخفض حد الكلال وحد الصمود.

٢- الانتهاء السطحي surface finish

إن الانتهاء السطحي الناعم مهم لتحقيق مقاومة كلال عالية، وعادة تصقل قطعة

اختبار الكلال. وتعطي السطوح المجلخه (ground surfaces) حد كلال منخفض ، حيث تؤدي الخدوش السطحية الى سهولة تكوّن شقوق الكلال مؤدية الى انخفاض كبير في مقاومة الكلال.

٣- تصميم الجزء component design

لا بد من الاحتياط عند التصميم لتجنب التغيرات الحادة في المقطع (كالانحناءات الحادة ذات الزوايا الصغيرة) وذلك لعملها الرافع او المركز للإجهاد والتي تبدأ منها شقوق الكلال. ويجب أن يكون السطح منتظماً دون تغييرات حاده او حزوز. والمواد الأقل مطيلية أكثر حساسية للحزوز السطحية من المواد الأكثر مطيلية. وتزداد حساسية الحز (notch sensitivity) بزيادة مقاومة الشد. لذلك فإن عملية إنهاء السطح وتنعيمه مهمة جداً للأجزاء المصنعة من الفولاذ عالي الشد (high tensile steel).

٤- معاملة السطح Surface treatment

بما أن شقوق الكلال تبدأ عادة عند السطح فإن طرائق التصليد السطحي كالكرينه والنترده والتصليد بالليزر وغيرها من الطرائق تؤثر على عمر الكلال. ويرجع تأثير التصليد السطحي الى توليد اجهادات انضغاطية متخلفة في السطح لتحسين عمر الكلال.

٥- وجود الاكتنافات Presence of inclusions

قد تعمل الاكتنافات اللامعدنية عند السطح او بالقرب منه كنقاط لبدء الشقوق ومن ثم تقلل من عمر الكلال. وتتصرف الاكتنافات الصلده بهذه الطريقة ولكن اللينه منها والتي تتشوه بسهولة (ككبريتات المنغنيز او الرصاص) فلها تأثير قليل جداً.

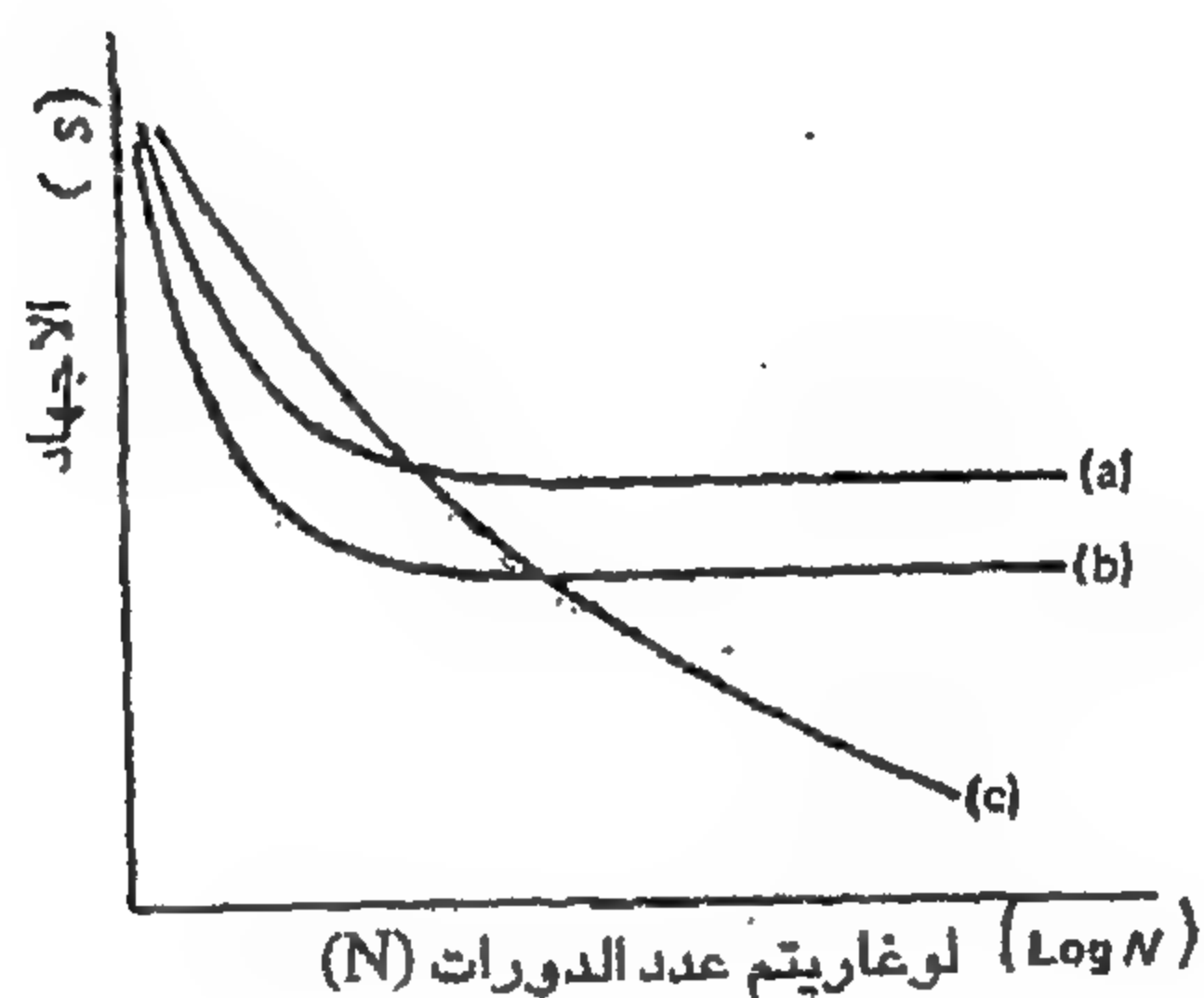
٦- درجة الحرارة Temperature

يزيد انخفاض درجة الحرارة عن درجة حرارة المحيط من حد الكلال عادةً، ومن الصعب تعميم تأثير الزيادة في درجة الحرارة لأنه من الممكن حدوث تغييرات في

بنية المادة عند تغير درجة الحرارة، مع أن حد الكلال الواضح لا يمكن الحصول عليه في العديد من حالات الاختبار عند الدرجات الحرارية العالية.

٧- الوسط (المحيط) Environment

عند وجود وسط أكال (فاعل)، قد تتكون نقر تأكليه (corrosion pits) صغيرة على السطح وقد تعمل هذه النقر كنقاط لتركيز الاجهاد ومن ثم كنقاط لنشوء شقوق الكلال. ويبين الشكل (10-31) خواص كلال التآكل، منحني (a) فولاذ ذو حد كلال عادي، منحني (b) لنفس الفولاذ ولكن عرضت قطع الاختبار لجو تأكلي قبل الاختبار. ويلاحظ بأنه مازال بالامكان الحصول على حد كلال واضح ولكن عند اجهاد منخفض (اقل من الاجهاد الاول). منحني (c) تم الحصول عليه لنفس الفولاذ ايضاً إلا أن الاختبار قد تم في جو تأكلي حيث لم يلاحظ حد الكلال، وقد انخفضت مقاومة الكلال بصورة كبيرة.



الشكل (10-31) تأثير التآكل على خواص الكلال.

a - الاختبار في جو عادي.

b - عرضت قطعة الاختبار أولاً إلى جو تأكلي ثم اختبرت.

c - الاختبار في جو تأكلي.

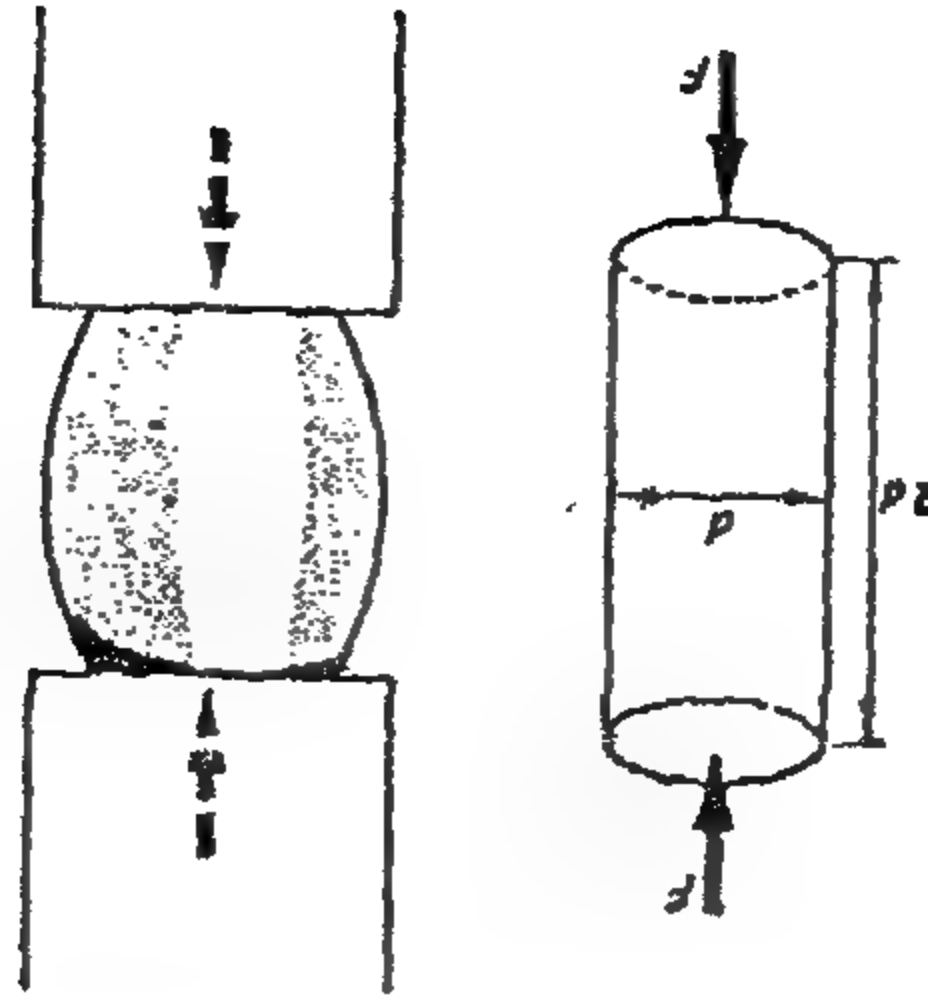
٩-١٠ طرائق فحص أخرى:

١-٤-١٠ اختبار الانضغاط compression testing

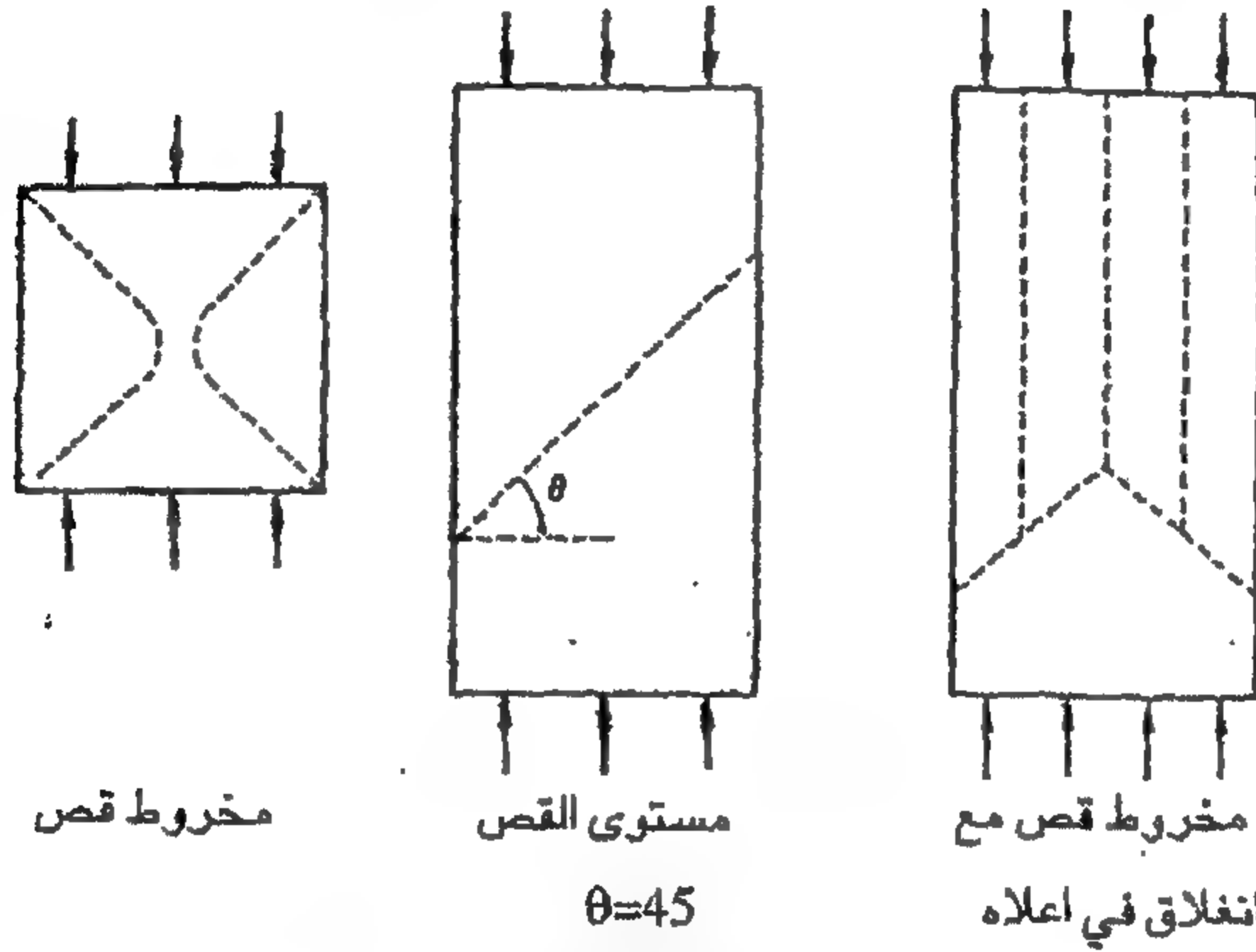
يمكن اعتبار اختبار الانضغاط اختباراً معاكساً لاختبار الشد إذ أن الحمل المسلط الأحادي المحور (uniaxial load) هو حمل انضغاطي لاشدي . ويستفاد من هذا الاختبار في تقييم المواد الهشة التي غالباً ما تستخدم في حالة الانضغاط لا الشد. أن المواد التي غالباً ما تفحص انضغاطياً هي حديد الزهر والاجزاء المنتجة من مساحيق المعادن (أي باستخدام ميتالورجيا المساحيق)، والعديد من المواد اللامعدنية كالكونكريت والسيراميك والخشب والطابوق.

وهناك أربعة مشاكل تصاحب الاختبار الانضغاطي:

- أ- صعوبة تسليط حمل محوري لصعوبة ضبط المركزية (centering) .
 - ب- محدودية التمدد الجانبي (Lateral expansion) بسبب القوى الاحتكاكية عند السطح البيني للساندات (الضاغطات) ونهايتي العينة والتي تعطي للعينة شكل البرميل (الشكل 10-32).
 - ج- ميل الصفيحة للتحذب (buckling) تحت الحمل ، ويتم التغلب على هذا النوع من التغيير الانضغاطي وبمقدار كبير باستخدام عينات ذات نسبة طول إلى قطر لا يتجاوز 1:3 .
 - د- الحاجة إلى عينات بأقطار أكبر من الاقطار المستخدمة في اختبارات الشد وستحتاج هذه العينات إلى أحمال أكبر.
- أن نتائج الاختبار المذكور هي - عادة - لايجاد اجهاد حد التناسب للمواد المطيلية ومقاومة الضغط للمواد الهشة. وتعرف هذه الخواص بنفس تعريف مصطلحات اختبار الشد. وتفشل المواد الهشة عادة بإحدى الطرائق الثلاثة المبينة في الشكل (10-33).



الشكل (32-10) أخذت عينه الاختبار شكل البرميل في اختبار الانضغاط.



مخروط قص

مستوى القص

مخروط قص مع

انغلاق في اعلاه

$\theta=45$

الشكل (33-10) انواع الفشل الانضغاطي في مادة هشة.

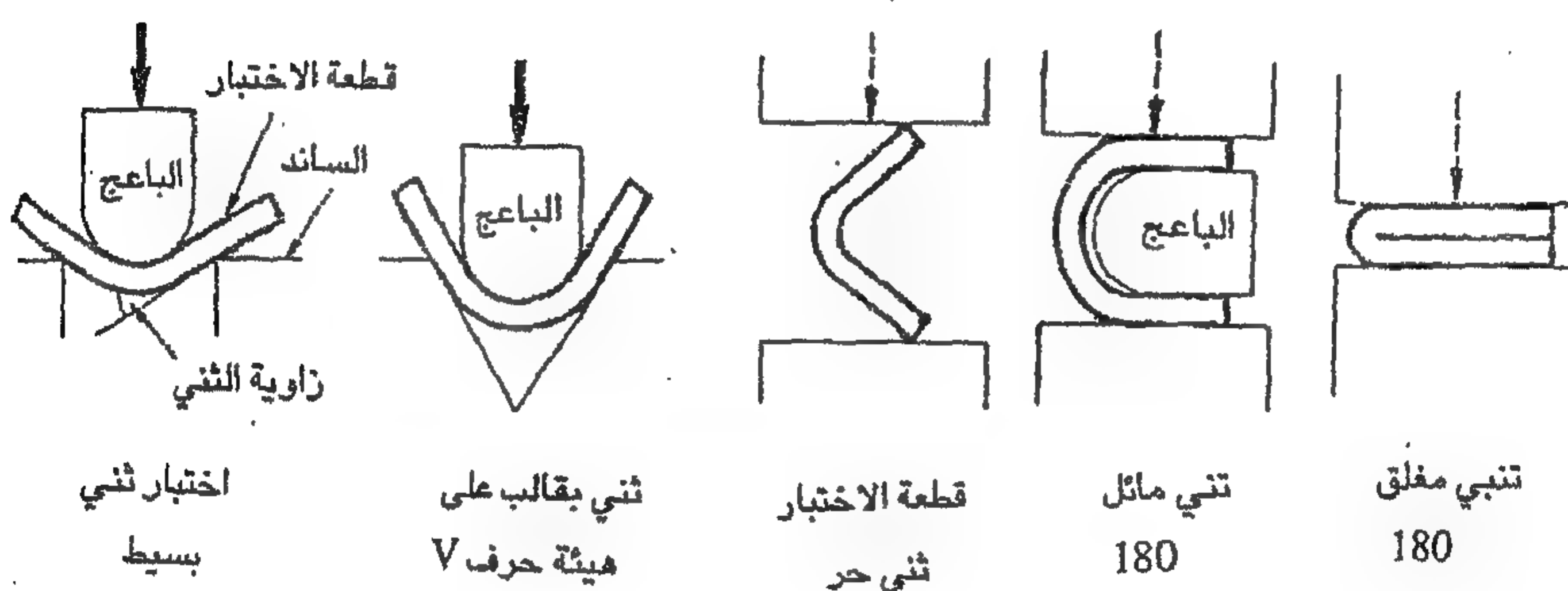
١٠-٩-٢ اختبار الثني (الانحناء) Flexural (Bend) testing

يوفر اختبار الثني طريقة اختبار ايسر من اختبار الشد في تعيين مطيلية المواد او ملائمتها لبعض الاغراض الخاصة. فعلى سبيل المثال تم عمل العديد من الاشكال المختلفة لاختبارات الثني كطريقة سريعة لاختبار نوعية الصفائح او الشرائط او القضبان. وربما تنتهي قطعة الاختبار لقطر معين ولزاوية محدده وتقيم المادة على انها مستوفيه اذا لم يحدث التشقق. وعند اختبار صفيحة او شريط

(strip) لابد من تحديد عرض قطع الاختبار، فالعينه الاكثر عرضاً لها قابلية اعلى على التحمل قبل التشقق .

والطريقة البديله لثني المادة المسطحة (flat material) هي تثبيت قطعة الاختبار في ملزمه (Vice)، وثني المادة بعد ذلك بزاوية مقدارها 90° ثم يكرر ثنيها بالاتجاه المعاكس وبمقدار 180° حتى يحدث الكسر، يؤخذ عدد الثنيات عند 180° كمقياس للمطيلية. ويستخدم اختبار الثني العكسي (reverse bend test) احياناً لاختبار المواد الرقيقة.

وقد تطرقت المواصفة البريطانية BS 1639 لاختبار الثني . يبين الشكل (10-34) بعض طرائق اختبار الثني الاكثر شيوعاً.

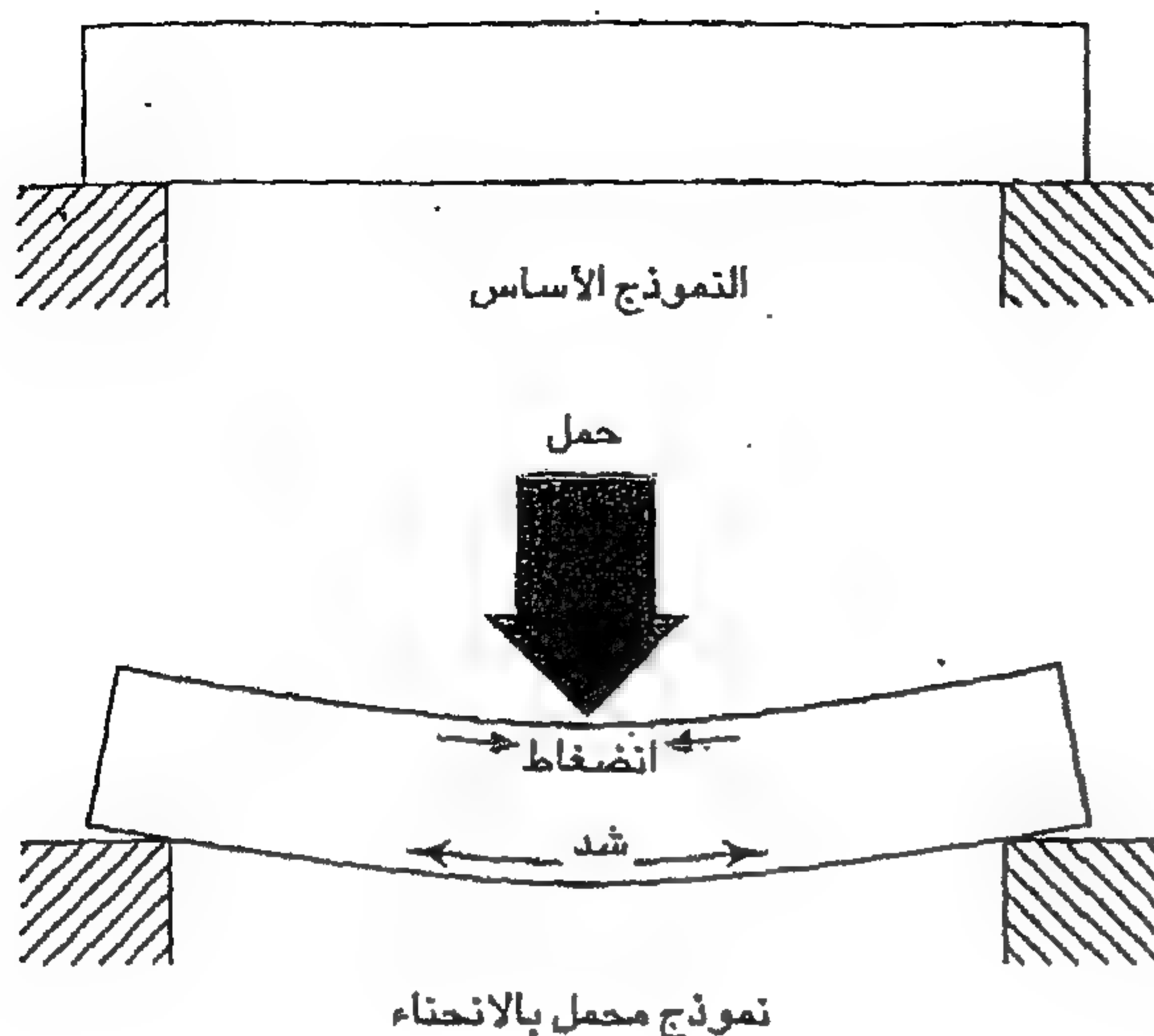


الشكل (10-34) أنواع اختبار الثني.

مقاومة الانحناء (Flexural Strength) :

تتضمن بصفة عامه شد على أحد جانبي العينه (الماده) وانضغاط على الجانب المقابل كما في الشكل (10-35) .

يظهر هذا النوع من مقاومه في العوارض (beams) والاذرع.



الشكل (10-35) ماره محمله بالانحناء تتعرض الى كل من اجهادي الشد والانضغاط. فالجزء العلوي لهذا النموذج معرض للانضغاط بينما يتعرض الجزء السفلي للمط بالشد.

فعند تسليط الانحناء على جزء ما فسيولد اجهاد شد على احد جانبيه واجهاد انضغاط على الجانب المقابل . وفي العارضه المتناظره يمكن حساب اعلى اجهاد (Maximum stress) باستخدام العلاقة التالية:

$$\text{Flexural stress} = \frac{MC}{I}$$

M = عزم الانحناء (lb) bending moment .

C = المسافة من المحور المتعادل للجزء (in) .

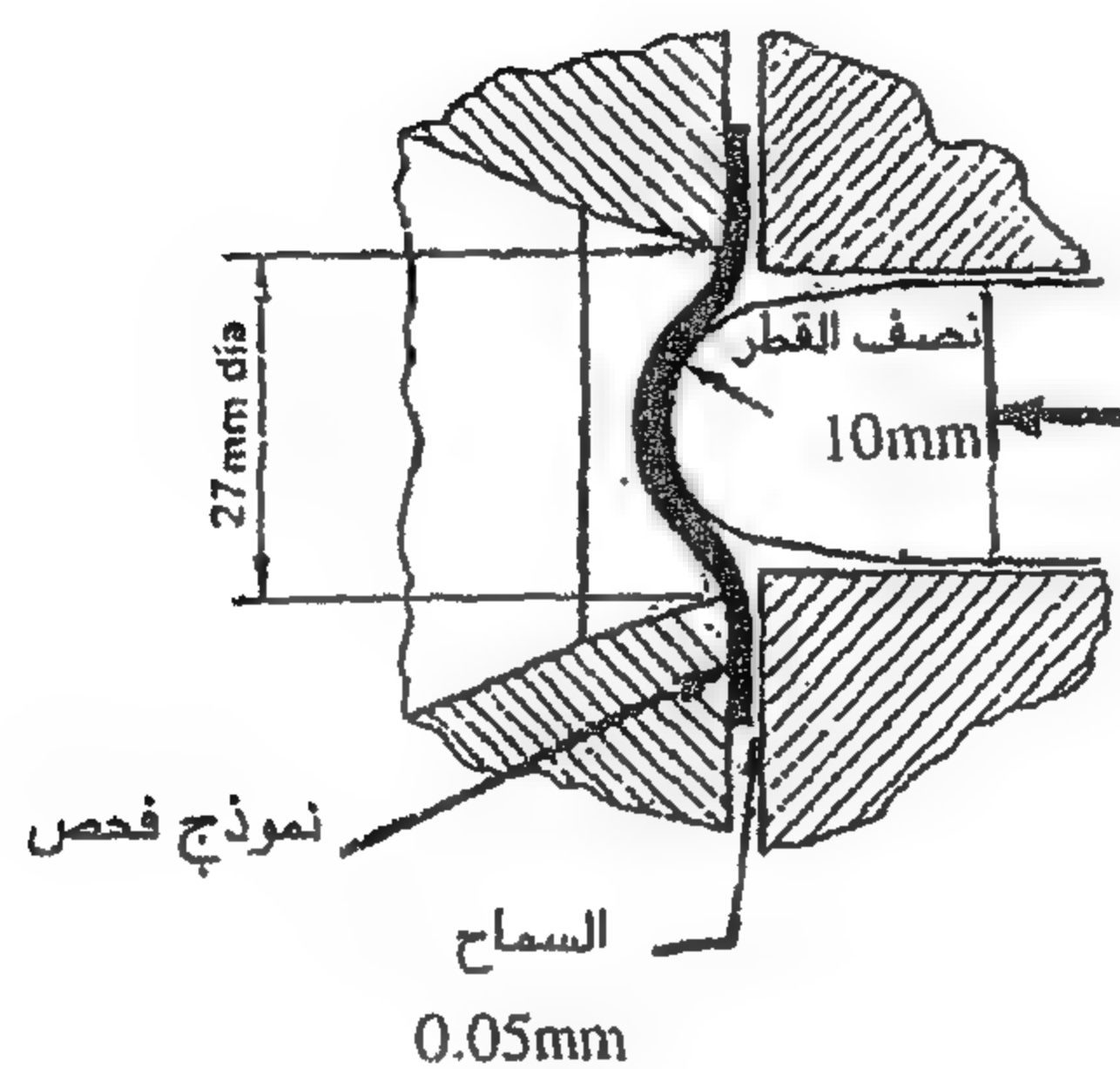
I = عزم القصور الذاتي (moment of inertia) والذي يمكن حسابه كالاتي:

$$I = \frac{\pi D^4}{64}$$

D = قطر الجزء (النموذج) (in)

٣-٩-١٠ اختبار اريكسن لفحص الثقيب Erichsen Cupping test

يتم تثبيت صفيحة الاختبار البالغ مساحتها 180mm^2 ، عادة ، ما بين طوق القالب (die ring) وحامل الغفل (blank holder) كما مبين في الشكل (10-36). تضغط أداة غرز مزيتة (Lubricated indenter) على العينه عند مركزها حتى يحدث الفشل بالتشقق عند قمة القدح (Cup dome).



الشكل (10-36) أساس اختبار اريكسن (Erichsen) للثقيب .

ويمثل القدح المتكون الذي يعتمد على سمك الصفيحة مقياساً للمطيلية، بينما يعطي الفحص بالنظر للسطح الخارجي للقدح، باستخدام عدسه مكبره ذات قوة تكبير منخفضة. تخميناً للحجم الحبيبي (يعطي الحجم الحبيبي الكبير سطحاً خشناً «تأثير قشرة البرتقال») ويشير أيضاً الى حالة الانهاء السطحي المحتمل . كما ان الفحص بالنظر بوساطة العدسه، لشكل الشق واتجاهه مفيد ايضاً. وتبين وضعية الشق المماسه لقبة القدح اتجاهية الشق، اي ان الخواص المختلفة في الاتجاهات المختلفة تتناسب مع اتجاهية التشغيل ويشير تمرکز الشق في القبة لعدم

وجود اتجاهيه سائده، فالشق المتقدم مركزياً عبر القبه يمثل اتجاهية مادة هشة، ويعطي اي تخرصر حول الشق دليل على المطيلية.

ان التشويه معقد، في هذا الفحص، اذ انه غالباً مايتكون تشكيل ثنائي المحور مع سحب قليل نتيجة للإنسياب الى الداخل من حافات القالب. ويستخلص تفسير نوعي بعد الاختبار.

يعد اختبار اولسن للتقرب (Olsen cupping test) نوعاً محوراً لاختبار اريكسن.

٤-٩-١٠ اختبار اللي Torsion test :

قد يستخدم اختبار اللي لتقييم سلوك المادة المعرضه لاجهادات قصيه (shear-ing stresses). اذ تُعرض قطعة اختبار اسطوانية الشكل الى زوج اللي (twisting couple)، فتلوى احدى النهايتين بزاوية معينة نسبة الى النهاية الاخرى.

يتم رسم معلومات اختبارات اللي كمنحنى ما بين عزم الدوران ومقدار اللي (torque twist curve) ويعطي الاختبار العديد من المعلومات منها:

أ- معيار مرونة القص (معيار الجسوء moduls of rigidity)

ب- مقاومة خضوع القص.

ج- معامل الكسر (مقاومة القص الظاهرية apparent shearing strength).

ويمكن ان يعطي الاختبار قيماً نموذجية اخرى عن لدونة المادة عوضاً عن اختبار الشد والانضغاط نظراً لتجنب مشاكل التخرصر وعدم الاستقرار والاحتكاك.

وغالباً ما يتم تقييم الاسلاك باستخدام اختبار اللي، اذ يثبت طول محدد من المادة في ملزمه من احد طرفيه بينما يكون بالإمكان تدوير الطرف الآخر. ويعطي عدد

الليّات (number of twists) التي يتحملها السلك قبل الكسر دليلاً على لدونته.

مقاومة الليّ Torsional strength :

يمكن ان تعرّف بأنها قابلية الماده لمقاومة القص الدائري الشكل (10-37). يحصل اللي عادة في اجزاء المكائن الدواره. فالقضبان ذات المقاطع الدائرية والتي تحمل طاقه هي أمثلة مألوفة لهذا النوع من المقاومه. فعندما يزداد الاجهاد اكثر فأكثر فإن بلورات المعدن سوف تنزلق على بعضها مما يؤدي الى كسر المقطع العرضي للجزء (القضيب). يحسب اعلى اجهاد ليّ في قضيب ما كالآتي :

$$\text{اجهاد اللي (Torsional stress)} = \frac{TR}{J}$$

حيث أن :

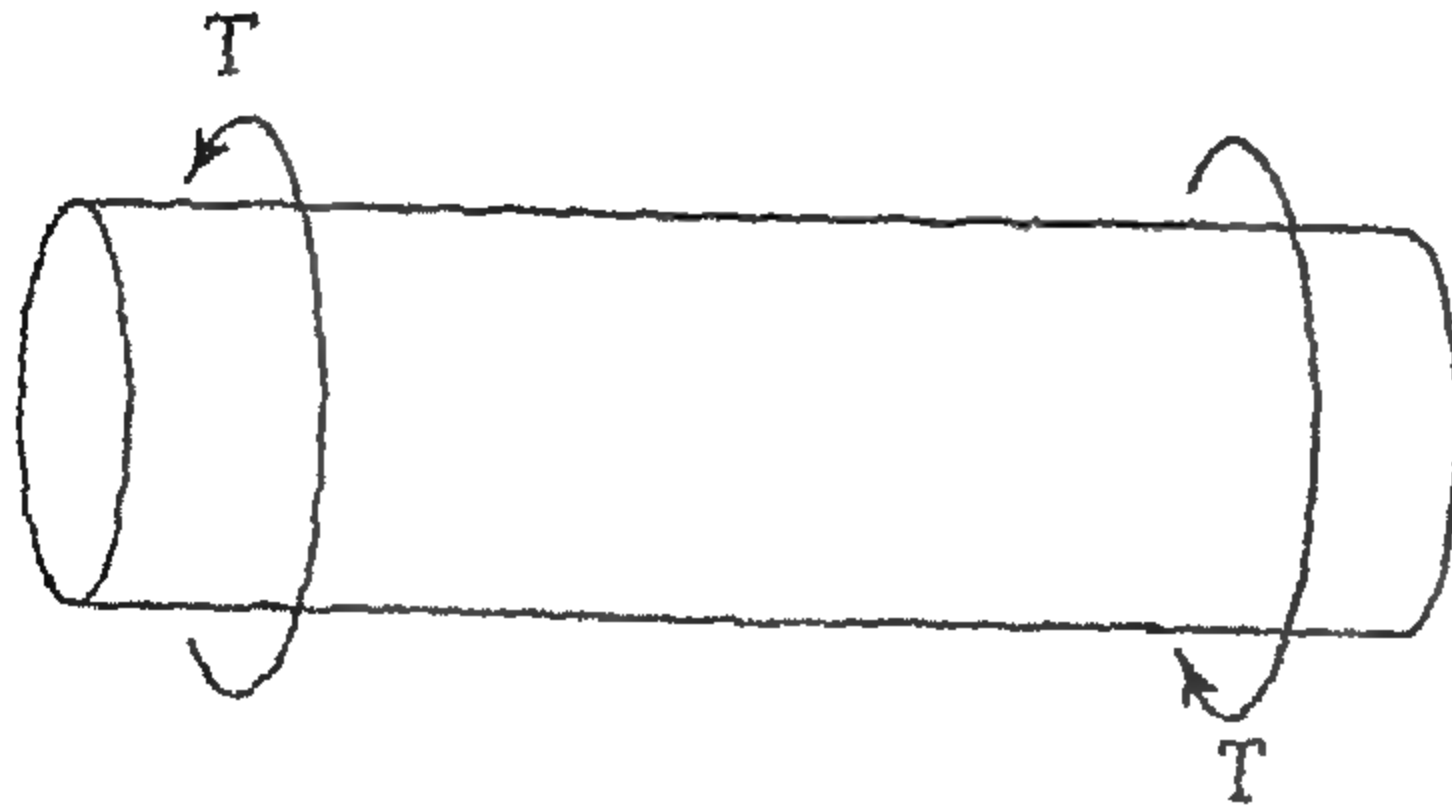
T = العزم المسلط .

R = نصف قطر القضيب.

J = عزم القصور الذاتي القطبي (Polar moment of inertia) والذي يمكن تعيينه باستخدام المعادلة التالية :

$$J = \frac{\pi D^4}{32}$$

D = قطر القضيب.



الشكل (10-37) يحدث اللي عندما تؤدي قوة ما الى دوران جزء من النموذج نسبة للجزء الآخر.

تمارين الفصل العاشر

- ١- عرّف مصطلح الصلادة المستخدم في اختبار المواد.
- ٢- (أ) اذكر ثلاثة اختبارات للصلادة تستخدم عادة لفحص المعادن واعط ميزة ومثله لكل منها.
(ب) حدد اي اختبار للصلادة يمكن استخدامه مع المواد غير المتجانسة ذات الصلادة المتوسطة.
- ٣- اشرح ما المقصود بمايلي، مستعيناً بالرسومات: حد التناسب وحد المرونة واجهاد الخضوع واجهاد الصمود.
- ٤- اعطى اختبار الشد لعينه اختبار من الفولاذ بقطر 8mm ومدلول مقياس طولي 40mm النتائج التالية:
حمل الخضوع 18.5kN واقصى حمل 22.5kN ومدلول مقياس الطول النهائي 60mm= والقطر عند الكسر 6mm= .
احسب: أ- مقاومة الخضوع . (ب) مقاومة الشد . (ج) الاستطالة بالمئة (د) التخصر في المساحة بالمئة (%).
- ٥- تم الحصول على النتائج التالية من اختبار الشد لعينه اختبار من سبيكة المنيوم بقطر 8mm ومدلول مقياس طول 40mm .
الحمل (kN) : 0 4 6 9 12 14 15 16 17 17.5
الاستطالة (mm) : 0 0.036 0.054 0.8 0.11 0.13 0.15 0.18 0.2 0.28

أرسم منحنياً بيانياً ما بين الحمل والاستطالة واستخدمه في إيجاد .

أ- 0.2% اجهاد الصمود .

ب- معامل المرونة .

ج- اجهاد حد التناسب .

٦- (أ) اذكر اختباري صدمة لقضيب محزوز .

(ب) اذكر سبب تحديد أحد الاختبارين المذكورين أعلاه في إيجاد قيمة الصدمة لفولاذ عند 10°C - .

(ج) بيّن بالرسم كيف تصطدم قطعة الاختبار في الاختبارات أعلاه .

٧- (أ) ما المقصود بزحف المواد المعدنية .

(ب) ارسم منحنى زحف نمطي .

(ج) اذكر مجموعتين من الحالات التي قد يحدث عندها زحف ملحوظ .

٨- (أ) عرّف مصطلح حد الكلال .

(ب) ارسم شكلاً مبسطاً يوضح ماكنة أو هلر لاختبار الكلال .

(ج) ارسم شكلاً يوضح سمات سطح تم كسره بالكلال .

(د) اذكر أربعة عوامل تؤثر في مقاومة الكلال .

(هـ) قارن بين منحنيات S-N لفولاذ بسيط وسبيكة من الألمنيوم

٩- بيّن أربع مشاكل تواجه الاختبار الانضغاطي وأشر إلى كيفية التخلص منها أو تقليلها .

١٠- (أ) بيّن المعلومات المفيدة التي قد يوفرها اختبار ثني مادة معدنية .

(ب) ارسم شكلاً توضيحياً يبين اختبار التثني.

١١- إذا كان قطر الجزء (النموذج) هو 0.75 in وكان مقدار العزم المسلط، المسبب للانحناء، عند نقطة الكسر هو 8800 in-lb فما هو اجهاد الانحناء؟

١٢- (أ) ماهي البيانات المفيدة التي قد يوفرها اختبار اركسن لفحص التقبب .

(ب) ارسم شكلاً توضيحياً يبين اختبار اركسن لفحص التقبب.

١٣- إذا كان العزم المسلط ، المسبب للثني، هو 555 in . lb وكان قطر القضيب 0.375 in فأحسب اجهاد اللي .

الفصل الحادي عشر

تقنيات الفراغ Vacuum Technology

١-١١ المقدمة:

من المعلوم ان المادة تتألف من ذرات او جزيئات دائمة الحركة، وبوساطة هذه الحركة يمكن تفسير الكثير من خواص المادة الفيزيائية.

ويعود السبب في اختلاف حالات المادة (صلبه او سائلة او غازية) حسب النظرية الحركية للمادة الى اختلاف درجة الحرية (degree of freedom) للجزيئات المكونه لها. وبناءً على ذلك تكون جزيئات (او ذرات) المادة الصلبة مترابطة ومترابطة فيما بينها بقوة تمنع حركتها ماعدا الحركة الاهتزازية لكل جزيئة او ذره حول موضعها الثابت.

وعندما يسخن الجسم الصلب تزداد اهتزازات جزيئاته حتى تصل الى حد التغلب على الطاقة الرابطه بينها ومن ثم ينتقل الجسم الى الحالة السائلة.

وإذا ما سخنت المادة اكثر فأكثر، فإنها ستتغلب كلية على القوة الرابطه بين جزيئاتها، بعد زيادة طاقتها الحركية، حيث تتحول المادة الى الحالة الغازية. وعند هذه الحالة لن تستمر الجزيئات في الاهتزاز وانما تصبح غير مرتبطة ببعضها اي تكون حرة الحركة تماماً.

٢-١١ الضغط:

تفترض النظرية الحركية للغازات، عند وجود الغاز في وعاء مغلق، ان تصادم الجزيئات، التي لها كتلة معينه، يكون مرناً مع جدران الوعاء الحاوي للمساء. ان

مجموع القوى الناتجة من تصادم الجزيئات مع جدران الوعاء هو الذي يسبب الضغط. حيث يُعرّف الضغط (P) بأنه القوة المسلطة على وحدة المساحة. ويمكن اشتقاق المعادلة الآتية عند استخدام بعض الفرضيات البسيطة

$$P = \frac{1}{3} n m v^2 \quad \dots\dots\dots(1-11)$$

حيث تمثل v معدل سرعة الجزيئه

و m كتلة الجزيئه.

و n العدد الكلي للجزيئات في وحدة الحجم

و P ضغط الغاز

يمكن كتابة المعادلة اعلاه كالآتي:

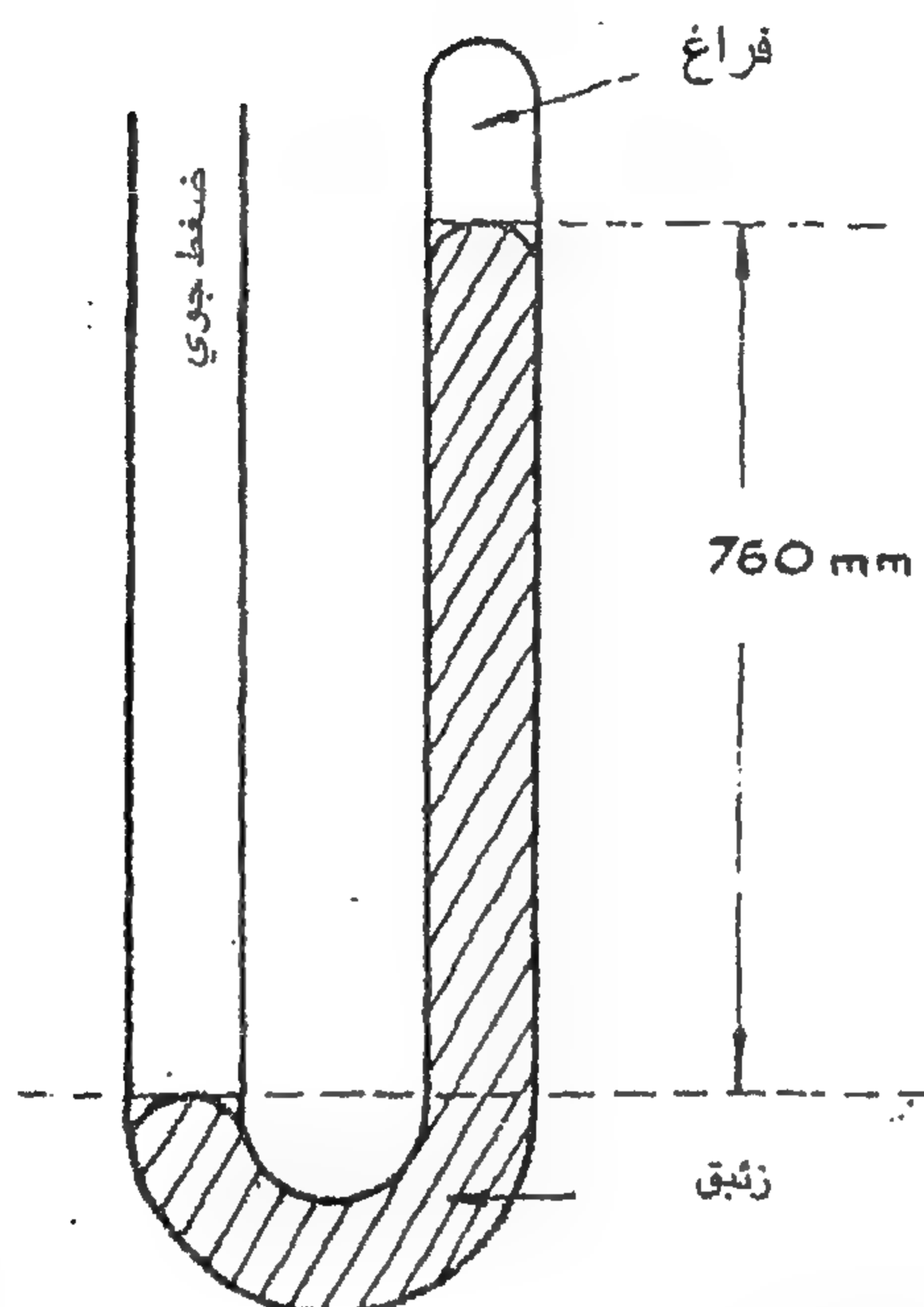
$$P = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) \quad \dots\dots\dots(2-11)$$

حيث ان $\frac{1}{2} m v^2$ تمثل متوسط الطاقة الحركية للجزيئه الواحدة. والمقدار $n \left(\frac{1}{2} m v^2 \right)$ يمثل متوسط الطاقة الحركية لجميع الجزيئات في وحدة الحجم وعليه فالضغط $= \frac{2}{3}$ (متوسط الطاقة الحركية للجزيئات في وحدة الحجم).

من المعلوم ان جميع الاجسام على سطح الكره الارضيه تقع تحت تأثير وزن الهواء الكائن فوقها، وهذا ما يدعى بالضغط الجوي (atmospheric pressure). يتغير ضغط الهواء عند تغير كثافته. يدعى الضغط داخل وعاء يحتوي على غاز او بخار بالفراغ (vacuum) عندما يكون اقل من الضغط الجوي. للفراغ في العصر الحديث أهمية كبيره في الكثير من التطبيقات الهندسية والصناعية والبحوث.

والطريقة البسيطة لقياس الفراغ هي استخدام انبويه زجاجية على شكل حرف (U) تكون مملوءة بالزئبق الشكل (1-11). يتم غلق احد طرفيه بعد ازالة الهواء منه. يضغط الهواء الخارجي الزئبق الى الأسفل عند الطرف المفتوح للأنبوبة فينسب

الزئبق لكي يتم الاتزان بين وزن عمود الزئبق في الطرف المغلق مع القوة التي يسلطها الضغط الجوي على الطرف المفتوح. يعتمد الضغط على ارتفاع عمود الزئبق فقط وليس له علاقة بقطر الأنبوبة الزجاجية او كمية الزئبق . يفضل دائماً استخدام الزئبق لانه يعطي ارتفاعاً مناسباً.



الشكل (1-11) مضغط انبوبي زئبقي بسيط (Simple mercury manometer)

١١-٣ وحدات الضغط:

تم استخدام مليمتري من الزئبق كوحدة لقياس الضغط . وهو عبارته عن الضغط الذي يسلطه عمود من الزئبق ارتفاعه مليمتري واحد. أصبحت هذه الوحدة فيما بعد وحدة قياسية تسمى تور (torr) اي أن 1 ملم زئبق = 1 تور .

والشائع في تقنية الفراغ هو تقسيم الضغط الاقل من الضغط الجوي (760 torr) الى مجاميع مختلفة المديات هي:

- ١- الفراغ الأولي، ويتراوح بين 760 الى 1 تور .
- ٢- الفراغ المتوسط ، ويتراوح بين 1 الى 10^{-3} تور.
- ٣- الفراغ العالي، ويتراوح بين 10^{-3} الى 10^{-7} تور .
- ٤- الفراغ العالي جداً او الاعلى وهو دون 10^{-7} تور.

وقد قدر عدد جزيئات الهواء في كل سنتيمتر مكعب واحد ولكل ضغط كالاتي:

الضغط / torr (تور)	عدد الجزيئات لكل 1cm^3
1 - 760	$10^{16} - 10^{19}$
$10^{-3} - 1$	$10^{13} - 10^{16}$
$10^{-6} - 10^{-3}$	$10^{10} - 10^{13}$
$10^{-11} - 10^{-6}$	$10^5 - 10^{10}$

٤-١١ قياس الفراغ:

تستخدم بعض الخواص الفيزيائية لقياس الضغوط القليلة ، علماً بأن قياس الضغوط القليلة عملية صعبة للغاية . وكما تم ذكره آنفاً، فإن الضغط يتناسب مع (nmv^2) وعليه فإن مقاييس الضغط تقيس الضغط بدلالة كل من n و m و v^2 . ويمكن تصنيف المقاييس الى عدة مجاميع:

أ- المقاييس الهيدروستاتيكية: Hydrostatic gauges

وتمتاز هذه المجموعة بتسجيلها الضغط الحقيقي الذي يسلطه الغاز، وتشمل المانوميتر (manometer) ومقياس بوردن (Bourden gauge) ومقياس مكلاود (Mecleod gauge) .

ب- مقاييس الطاقة الحرارية: (Thermal energy gauges)

وتعتمد هذه المجموعة في قياس الضغط على الموصلية الحرارية للغاز، وتشمل مقاييس المزدوج الحراري ومقياس بيراني (Pirani gauge).

ج- مقاييس الطاقة الكهربائية Electric energy gauges:

وتعتمد هذه التقنية على تأين الغاز وذلك بقياس التيار الكلي للأيونات، وتشمل هذه المجموعة المقياس الايوني للمهبط الساخن (Hot-cathode ionization gauge) ومقياس بنك الايوني (Penning Ion gauge).

د- مقاييس التفريغ الكهربائي Electric discharge gauges:

يعتمد التفريغ الكهربائي في الغاز على بعض العوامل ، وأحد هذه العوامل هو ضغط الغاز الموجود في حجرة الفراغ. لذلك يمكن قياس ضغط الغاز من خلال التفريغ الكهربائي المتولد فيه.

١١-٥ توليد الفراغ Creation of vacuum:

الواقع لم يتم لحد الآن اكتشاف مضخة لتفريغ وعاء ما ابتداء من الضغط الجوي حتى الضغوط القليلة التي نحتاجها في الوقت الحاضر (اي حوالي 10^{-7} تور أو أقل)، وهذه من المشاكل الاساسية في تقنية الفراغ.

وبالرغم من تعدد قواعد اشتغال المضخات الفراغية لكنها تنصب جميعاً في مبدأ واحد هو تقليل الضغط P ، وذلك بتقليل الطرف الايمن من المعادلة (3-11).

$$PV = \frac{1}{3} Nmv^2 \quad \text{..... (3-11)}$$

V حجم الغاز وأن $nV = N$ ، وتمثل عدد جزيئات الغاز الموجود في وحدة الحجم. وهذا يعني تقليل عدد الجزيئات أو تقليل طاقتها الحركية من خلال تقليل السرعة. ويتم ذلك بخفض درجة حرارتها أو بطرد جزيئات الابخره الموجوده.

هناك عدد من المضخات (Pumps) الممكن استخدامها في أجهزة الفراغ إلا أن المستخدم في الغالب هي:

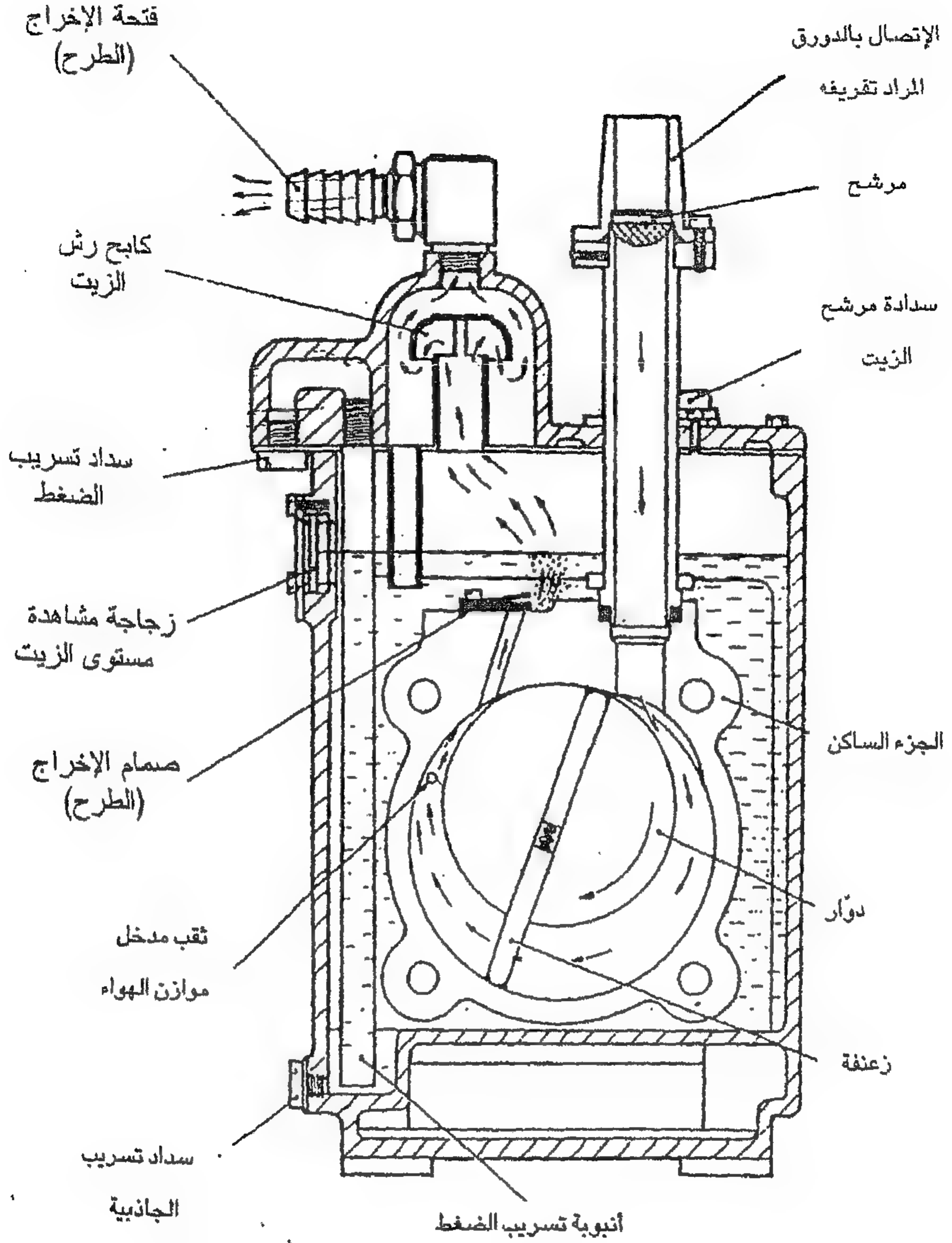
أ- مضخة الفراغ الدوارة Rotary vacuum pump :

يبين الشكل (2-11) مضخة فراغ دوارة نموذجية. يدخل الهواء عند اشتغالها عن طريق وصلة إلى داخل الحجم الذي يولده الدوار اللامركزي والمثبت على الجزء الثابت، يكبس هذا الحجم بواسطة الريشتان المركبتان على الدوار ويضغط الهواء المقتنص إلى ضغط أكبر من الضغط الجوي وهذا يسبب فتح صمام الخروج لطرد الهواء المقتنص نحو الحمام الزيتي الذي يمثل عازل عن الجو.

لا تستطيع المضخات الكبيرة من هذا النوع الوصول إلى فراغ أكثر من حوالي 5×10^{-3} torr وذلك نتيجة للتسرب الخلفي للهواء من خلال الجزء الثابت ومقعد الدوار بالإضافة إلى التفريغ الإضافي (out gassing) لزيت التفريغ. وللتغلب على هذه المشكلة تضاف حجرة ثانية على التوالي، وعندئذ تدعى المضخة بذات المرحلتين بدلاً من المضخة ذات المرحلة الواحدة. توضع المرحلة الثانية خلف المرحلة الأولى وتتصل معها بواسطة فتحة انتقال داخليه.

عند الضغوط القليلة، سوف يقل اختلاف الضغط بين الجزء الثابت ومركز الدوار في مرحلة الفراغ العالي، وغالباً ما يتعدى مرحلة التسرب الخلفي. ويغذي زيت التزييت مرحلة الفراغ العالي من المرحلة الأولى والذي يكون خالي من الغاز (de-gassed) تقريباً قبل دخوله مرحلة الفراغ العالي.

تمتاز هذه الطريقة بكفاءتها في التفريغ عند تعاملها مع الغازات الاعتيادية، لكنها تعاني صعوبة عند تعاملها مع الأبخرة المتكاثفة كبخار الماء الذي يتواجد دائماً في الجهاز المراد تفريغه. لذلك أدخلت تطويرات على هذه المضخة تعتمد على أكثر من تقنية للتغلب على هذه المشكلة.



الشكل (2-11) مضخة تفريغ دوّاره نموذجية

.(Rotary vacuum pump)

ب- المضخات البخارية Vapour pumps:

تستخدم المضخات الميكانيكية الدوارة في الفراغ الأولي إلى المتوسط ، ولا تكون صالحة للإستخدام عندما يتطلب الأمر ضغطاً اقل من 10^{-3} torr . والمضخات الشائعة الاستخدام في مدى الفراغ العالي هي المضخات البخارية والتي تدعى عادةً المضخات الانتشارية (Diffusion pumps) .

تصنف هذه المضخات إلى ثلاثة أنواع هي:

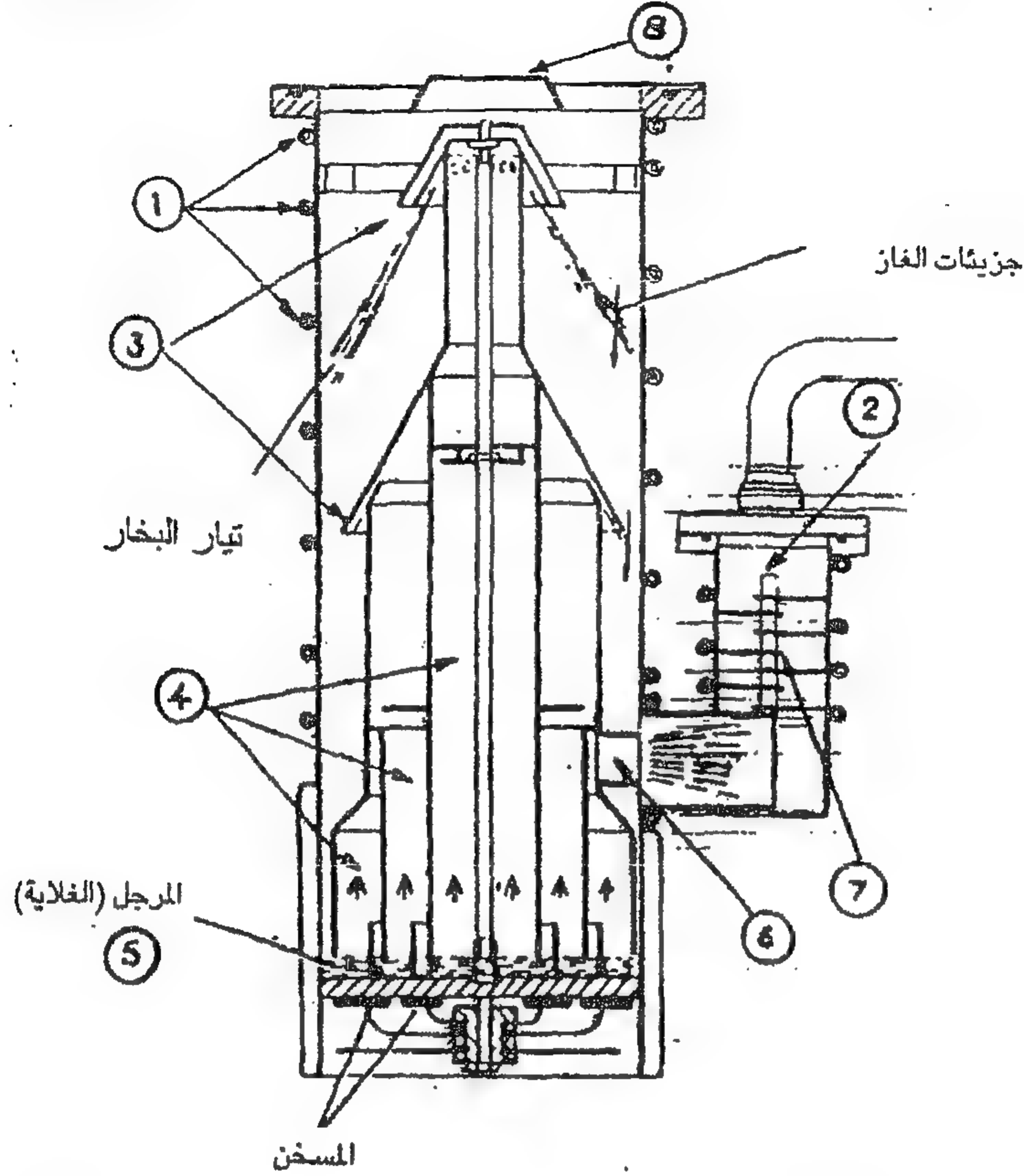
- ١- المضخات الانتشارية وتستخدم للتفريغ من 10^{-3} إلى 10^{-7} torr .
- ٢- مضخات القذف المنشطة وتستخدم للتفريغ من 10^{-1} إلى 10^{-2} torr .
- ٣- المضخات الانتشارية المنشطة وتستخدم لتعزيز المضخة الانتشارية بهدف زيادة مداها.

ان أساس عمل جميع المضخات البخارية واحد، حيث تُجذب (تجرف) الغازات المراد إزالتها وذلك ببثق بخار الزيت أو الزئبق في الحجرة حيثما تنتشر الغازات ثم إلى البثق الخارجي.

عمل المضخة الانتشارية الزيتية:

توضع كمية من الزيت في قاعدة المضخة حيث يوجد المسخن. يتم تسخين وغليان الزيت بواسطة هذا المسخن (5)، كما مبين في الشكل (11-3) . يندفع بخار الزيت نحو الأعلى من خلال مداخن البثق (4) ومن ثم يضطر إلى الخروج من فتحات البثق (3) بسرعة عالية تفوق سرعة الصوت . تتكاثف جزيئات الزيت على جدران المضخة بسبب التبريد الناتج من ماء التبريد المار في الانابيب (1) ومن ثم تعود ثانية إلى المرجل (مستودع التسخين) ليعاد تبخيرها مرة ثانية. تضطر جزيئات الغاز الموجودة فوق الوعاء إلى الانبثاق والدخول إلى المنطقة الأكثر ضغطاً والموجودة في أسفل المضخة. وهنا يكون الضغط كبيراً بحيث تستطيع المضخة الدوارة من سحب كميات الجزيئات المتراكمة بنجاح من خلال الوصله الموجوده في مقدمة الفراغ (2) .

يستطيع الباثق ضغط الغاز المفرغ من منطقة الضغط القليل جداً إلى منطقة الضغط العالي جداً (بحدود عشرات المليمترات زئبق). فعلى سبيل المثال عندما يكون الضغط في المقدمة 10^{-6} تور فهذا يعني ان نسبة الضغط ستكون $\frac{1}{100000}$.



الشكل (3-11) رسم تخطيطي لمضخة انتشاريه (diffusion pump).

وتتصل بوصلة المقدمة كوابح مبرده (cooled baffles) تقوم بتكثيف بخار الزيت الذي تقذفه المضخة، وبعد ذلك يسمح له بالتصريف الخلفي الى المضخة . سوف يفقد مقدار كبير من الزيت الى الخط الخلفي اذا لم تتحقق هذه العملية وبذلك ستحتاج المضخة الى زيت اضافي.

النقاط المهمة في اشتغال المضخات الانتشارية:

ان الفكرة الأساسية في اشتغال المضخات هي تسخين الزيت الى درجة الغليان ومن ثم حصول التبخر. ان هذه المضخة لاتستطيع الاشتغال عند الضغط الجوي لان ذلك يؤدي الى تحطيم الزيت. وكذلك لايمكن للمضخة البدء بالإشتغال في الضغط الجوي، بل تحتاج الى تفريغ مسبق مع الجهاز الى درجة معينة من الفراغ بواسطة مضخات أخرى (كالمضخة الميكانيكية الدوارة) ومن ثم يمكن تشغيلها.

تحتاج المضخة ايضاً الى تبريد وذلك ليسهل تكثيف بخار الزيت على جدران المضخة، ومن ثم سحبه الى المرجل واعادة تبخيره. يتم التبريد اما بواسطة الملفات او الانابيب التي تلحم بجدران المضخة او بواسطة الغطاء المائي.

اما الهواء المزاح من الجهاز والمتجه نحو قعر المضخة والواقع تحت ضغط مخلخل فيجب تفريغه الى الخارج . وبذلك تحتاج المضخة الانتشارية الى مضخة أخرى تساندها وتوضع خلفها وذلك لإزالة الغازات التي لها ضغوط أكثر من 10^{-2} تور الى الضغط الجوي. ومن هنا جاءت ضرورة استخدام المضخة الدوارة.

تعتمد خواص الاشتغال الاساسية لاية مضخة انتشارية على مايلي:

١- كمية الطاقة الحرارية المزوده للمرجل.

٢- كثافة وضغط الزيت المستخدم في المضخة بالاضافة الى كميته.

٣- تصميم مجموعه القذف.

٤- مراحل تبريد جدران المضخة.

٥- القطر الداخلي وسعة المضخة.

وسوف نقتصر بالحديث هنا على ماذكرنا من أنواع المضخات وسوف نترك الحديث عن مضخات الفراغ العالي اي الاعلى من 10^{-7} تور الى المصادر المتخصصة وذلك لعدم صلتها بمفردات هذا الكتاب.

٦-١١ أجهزة التفريغ Vacuum Systems :

يمكن تقسيم أجهزة التفريغ الى قسمين:

١- أجهزة سكونيه Static Systems:

٢- أجهزة حركية (ديناميه) Dynamic Systems .

يكون الوعاء السكوني خالياً من الثغرات ومفرغاً ويتم طرد الغازات منه تدريجياً بواسطة التسخين أو القنص، ثم يعزل عن جهاز التفريغ. يتم حفظ مثل هذه الاجهزة بحالة من النظافة التامة. لكي تحافظ على الفراغ لأعلى درجة ممكنه. تصنع هذه الاوعية من مواد غير مساميه (nonporous) حتى لا يتدهور الفراغ الذي قد يحصل نتيجة للمج (desorption). ولذا تصنع هذه الاوعية من الزجاج عادة ومن ثم تغلق (تلحم) ومن الامثلة على ذلك انابيب الاشعة السينية وصمامات أشعة المهبط والصمامات الراديويه.

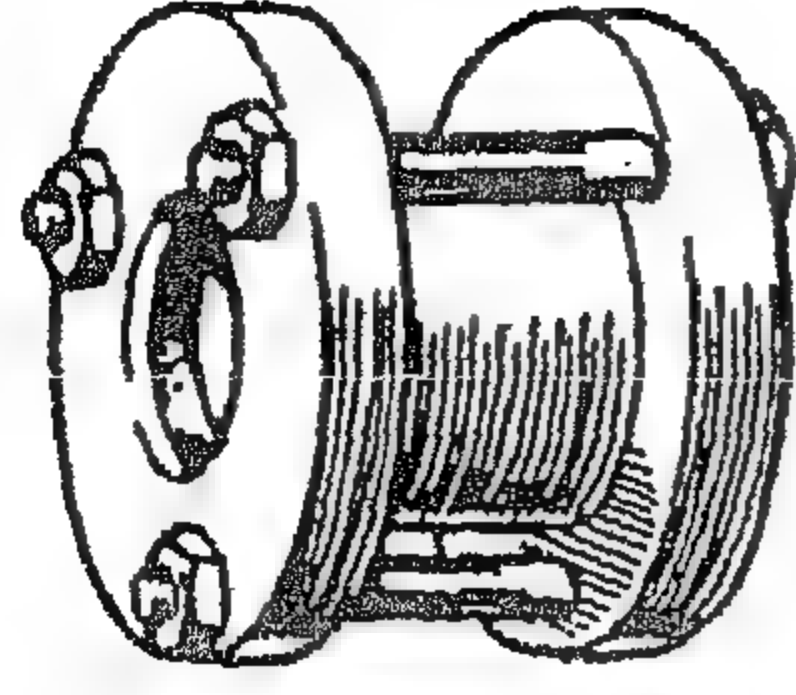
أما الاجهزة الحركية (الدينامية) فيكون التفريغ فيها مستمراً وذلك بسبب تسرب الغاز سواء من جدران الوعاء أو وجود ثغر أو عدة ثغور صغيرة جداً في مناطق الاتصال. يعتمد مقدار الفراغ المراد تحقيقه على حجم الثغر الموجود وعلى سرعة التفريغ المتاحة. تكون الاجهزة الموجودة في المختبرات أو المنشآت الصناعية من النوع الحركي وهو الأكثر أهمية في تقنيات الفراغ.

لقد سبق ذكر ان الاجهزة البسيطة المستخدمة في توليد الفراغ تتكون من المضخة الميكانيكية الدواره والمضخة الانتشارية أو المضخة الايونية (لم يتم شرحها هنا). وأنه تتوفر أنواع من مقاييس الضغط يمكن استخدامها في هذه الاجهزة. تصنع معظم اجزاء اجهزة الفراغ من المعادن مثل الوصلات النحاسية والاعوية الفولاذيه أو النحاسية أو من النحاس الاصفر (brass). تبني اجهزة الفراغ بدقه متناهية للحصول على فراغ فعال غالباً ما يكون ضرورياً في الكثير من التطبيقات.

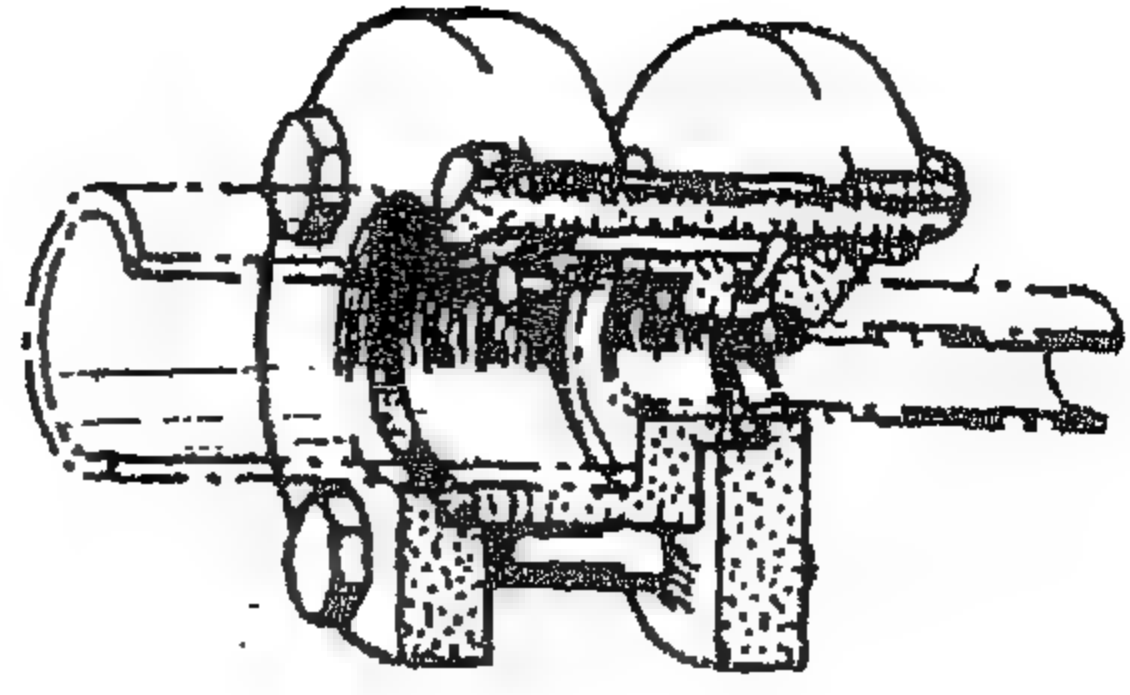
يجب عمل جميع الوصلات والتراكيب بحيث لا تسمح بوجود الثغرات، لان تحقيق الفراغ النهائي يعتمد على مجموع الثغور الصغيره الموجوده. اضافة الى وجوب تصميم جميع مقاييس الفراغ وصماماته بصورة محكمة لتحقيق الفراغ المطلوب. يعتمد الفراغ النهائي الممكن بلوغه، اضافة الى ما تقدم، على سرعة التفريغ في الانابيب والتراكيب الاخرى التي يتكون منها الجهاز.

لقد صممت في السنوات الاخيره عدداً من صمامات الفراغ و التراكيب القابلة للتفكيك، وتعتمد غالبيتها على السد المحكم وذلك باستخدام طوق داخلي، حشيه، (gasket) مصنوع من مطاط او من معادن طرية. لقد برهنت التراكيب القابلة للتفكيك نجاحها وخاصة تلك التي يستخدم فيها المطاط او مطاط النتريل (nitrile). وحيث ان المواد كالمطاط ومطاط النتريل لها ضغوط بخارية محسوسة فقد تسبب مشكلة خصوصاً عند درجات الحرارة العالية لذا تم تطوير مواد جديدة في الوقت الحاضر لغرض السد المحكم الحلقي (O-ring) كالفيتون (Viton) ولدائن الفلور (fluorinated). ويستخدم في الفراغ العالي طوق داخلي مصنوع من النحاس او الانديوم او القصدير خصوصاً اذا تطلب الامر رفع درجة الحرارة للحصول على تفريغ اعلى .

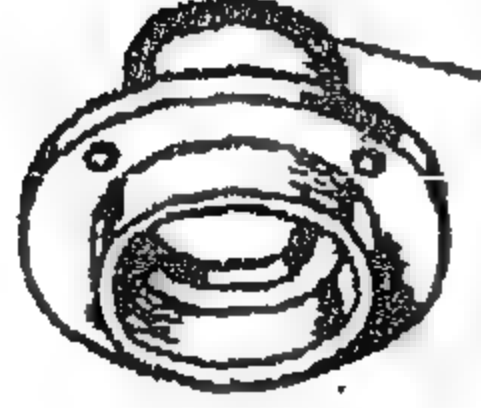
يبين الشكل (4-11) اشكال مختلفة من الوصلات القابلة للتفكيك والاستخدام المتكرر. ويجب الاشارة الى ان الصمام الكابح (baffle valve) المستخدم عند مدخل المضخة الانتشارية يكون ذو قطر اكبر او مساوٍ الى قطر المضخة لضمان بقاء سرعة التفريغ اعظم مايمكن. كما يجب ان تكون جميع التراكيب والانابيب المستخدمة في اجهزة الفراغ نظيفة وخالية من الزيوت والدهون.



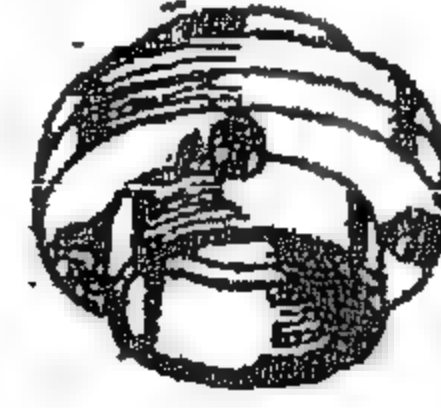
I.C.I.



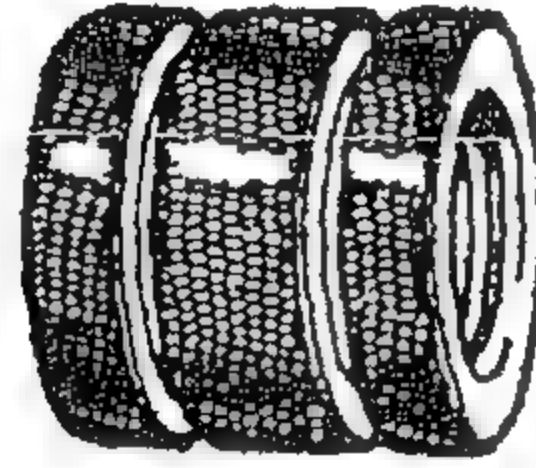
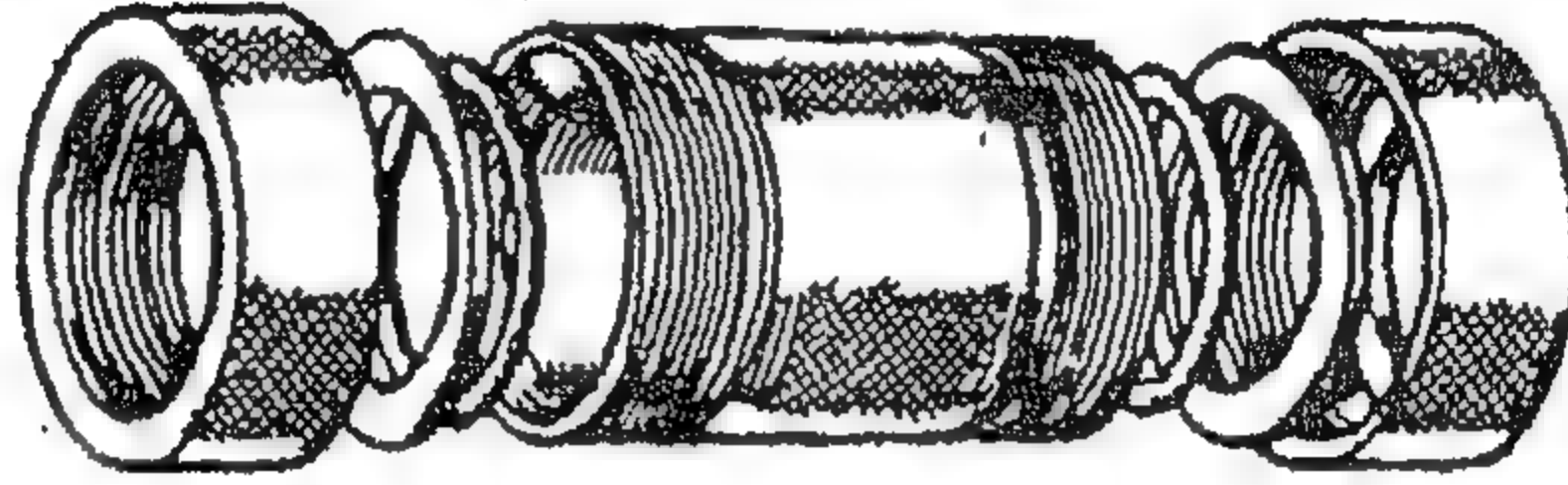
رابط ورابط مختزل
(لا يحتاج إلى لحام)



حلقه مطاطية



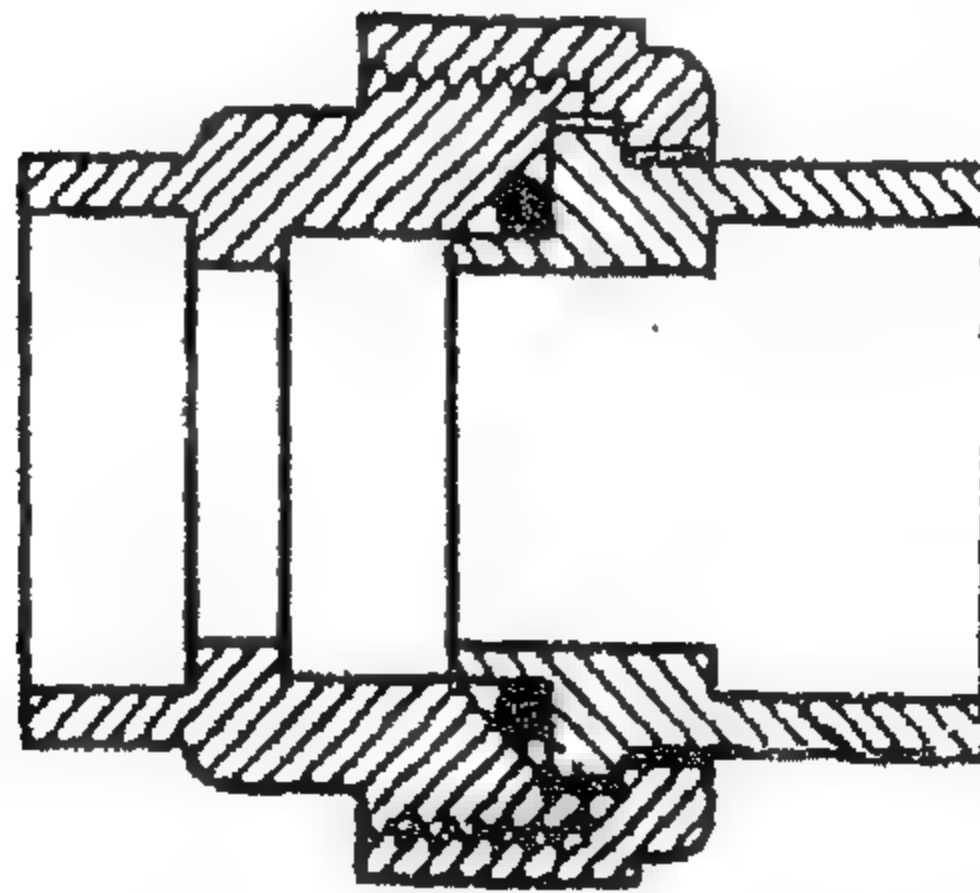
رابط ذو شفة (عادة ما يلحم بالأنبوب)



لا تتطلب لحام

(N.G.N.)

روابط العنق السريع



رابط عنق سريع يلزم لحامه مع الأنبوب

الشكل (4-11) وصلات نموذجية للأضباب المجوفة.

١١-٦-١ التشحيم Greasing :

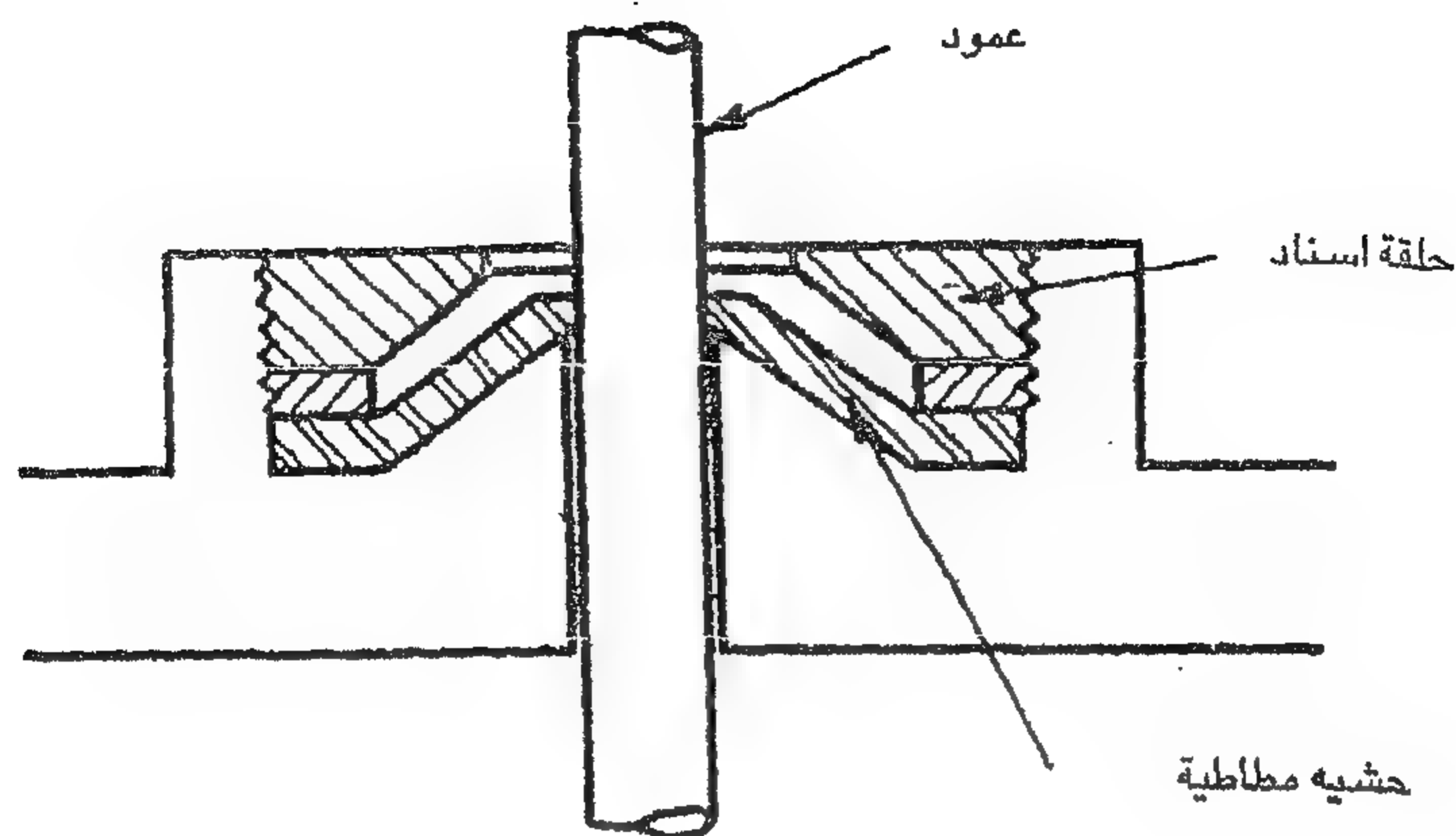
لا يتم عادة تحقيق السد المحكم في اجهزة التفريغ عند استخدام حلقات المطاط الجافة. ولذا تم تصنيع شحوم خاصة بالفراغ لتشحيمها وتكون ذات ضغوط بخارية واطئة. تختلف بعضها عن البعض الآخر من حيث سمك غشاء الشحم المستخدم ولزوجته والضغط البخاري ومدى درجات الحرارة التي يصلح لها هذا الشحم او ذاك اضافة الى مدى الفراغ المراد استخدامه معه، ومن هذه الشحوم، على سبيل ، شحم ابيزون L ("L" Apiezon) والمركب الكيماوي ابيزون "Q" و ابيزون "W" وأخيراً شحوم السليكون التي تصلح لدرجات حرارية بين 40°C - وحتى 200°C .

١١-٦-٢ أعمدة السد (Sealing shafts) :

استخدم سداد ولسن (Wilson seal) لأول مره لنقل الحركة الدائرية او الانتقالية من خارج جهاز الفراغ الى داخله، كالذي نحتاجه مثلاً في عمل الصمام الاعتراضي، الشكل (5-11) حيث تشطف سطوح الشفه (flange) الخارجيه الموضوعه على حجرة الفراغ ويثبت بها قرص مطاطي الى السطح المشطوف. يمر العمود المتحرك من خلال فتحة في القرص المطاطي لها قطر اصغر من قطر العمود. يسלט الضغط الجوي قوة على المطاط تجبره على الاحاطة بهذا العمود، وبوساطة وضع غشاء رقيق من شحم الفراغ يمكن غلق الثغرات حول العمود وإحكام السد بالرغم من انزلاق العمود او دورانه. ويمكن استخدام مقطع حلقي على شكل (O) ملائم يوضع في أخذود العمود او في جسم مسند العمود لتحقيق الغاية نفسها.

١١-٧ منظومة وحدة التفريغ Pumping Unit System :

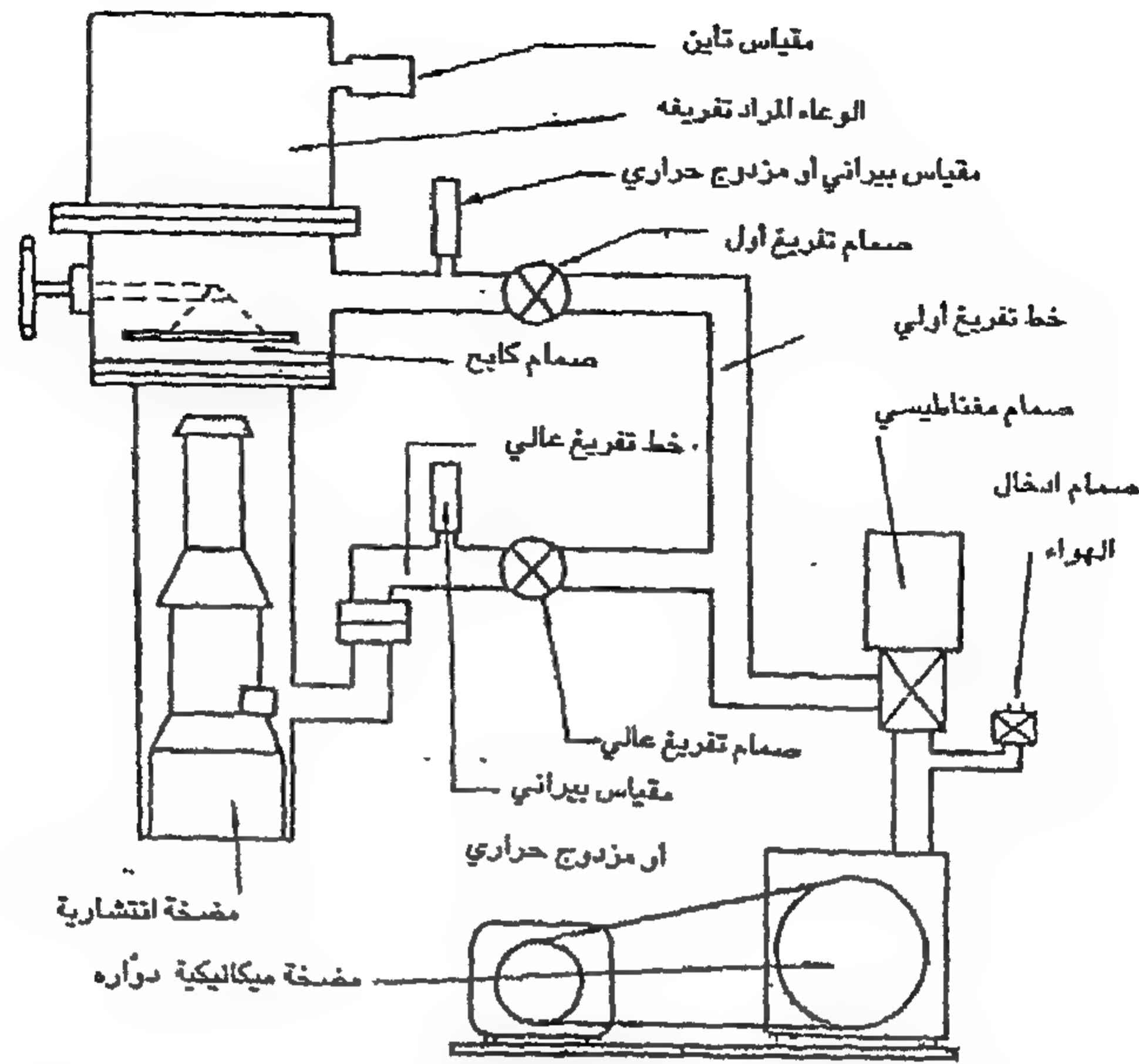
هناك تصاميم مختلفة لاجهزة الفراغ اعتماداً على درجة الفراغ المطلوبة وعلى حجم وتصميم الاوعية المراد تفريغها. وكل ما تحتاجه لتحقيق الفراغ الاولي هو شبكه من الانابيب تمتد من الوعاء المراد تفريغه الى المضخة الدواره. اما حجم وتصميم المضخة فتحددها متطلبات الجهاز . تستخدم المضخة الانتشارية عند الحاجة الى مدى فراغ عالي.



الشكل (5-11) اسلوب السد لولسن.

يبين الشكل (6-11) الاجزاء الرئيسية لوحدة الفراغ العالي. يكون الابتداء بتفريغ المنظومة من الهواء (الضغط الجوي) بوساطة المضخة الميكانيكية الدوارة. يتم بعد ذلك تشغيل المضخة الانتشارية التي تكون مسنودة من الخلف بالمضخة الميكانيكية الدوارة. يتم تحقيق هذين الغرضين باستخدام مضخة دوارة واحدة. فعند البدء بمجرى جانبي (by passed) الى خط التفريغ الاولي (roughing vacuum line) الذي يتصل مع الجهاز (أو الوعاء) المراد تفريغه بوساطة صمام التفريغ الاولي (roughing vacuum valve). يتم غلق هذا الصمام بعد التفريغ ثم يفتح الصمام الخلفي للمضخة الانتشارية كما يتم فتح الصمام الموجود فوق المضخة (صمام الاعتراض) المؤدي الى الجهاز.

ومن الناحية العملية يتم تفريغ المضخة تفريغاً اولياً ويكون صمام التفريغ الاولي مغلقاً والصمام الخلفي مفتوحاً. الى أن يقل ضغط المضخة بمقدار كافٍ ليبدأ



الشكل (6-11) وحدة تفريغ مع الأجهزة الأساسية.

تشغيل مسخن المضخة الانتشارية. وعندما تصبح المضخة ساخنة لدرجة الاشتغال الفعلي والجهاز محكم التفريغ وصمام الاعتراض مسدود بصورة محكمة . يمكن بعد ذلك غلق الصمام الخلفي مع استمرار المضخة في العمل.

يجب ملاحظة المقياس الموجود في الخط الخلفي بصورة مستمرة لمراقبة عدم زيادة الضغط اعلى من الضغط الخلفي للمضخة. وبعد غلق الصمام الخلفي يمكن فتح صمام التفريغ الاولي الى الوعاء لتفريغه . تستخدم المضخة المزودة بموازن الغاز (gas ballast) حيث من المحتمل ان يحتوي الوعاء المراد تفريغه على بخار الماء او ابخره أخرى حيث يجب فتح موازن الغاز قبل المباشرة بالتفريغ للتخلص من هذه الابخره.

يجب الاستمرار في تفريغ الوعاء الى أن يصبح الضغط المقاس في الخط الخلفي اقل من 2×10^{-3} تور. وبعد هذا يمكن غلق صمام التفريغ الاولي ثم يفتح صمام الاعتراض وتستمر المضخة الانتشارية بالتفريغ. اما إذا فتحت المضخة الانتشارية

الى الجهاز قبل نقصان الضغط الى اقل من 2×10^{-3} تور فمن المحتمل حدوث انسياب خلفي (back streaming) ويزداد الضغط في الخط الخلفي نتيجة لزيادة مايدخل المضخة (through put) وان الزيادة الكبيرة في الكمية الداخلة للمضخة ربما تسبب زياده الضغط الى القيمة الحرجة في الخط الخلفي . ويجب الاستمرار في التفريغ الاولي لأكبر فترة زمنية ممكنة او على الاقل الى ان يقترب الضغط من الضغط النهائي للمضخة الدوارة.

تتم قراءة ضغط الفراغ العالي بوساطة مقياس التأين المتصل بالوعاء . ويجب عدم فتح هذا المقياس اذا كان من نوع الشعيرة الساخنة مالم يكن قد مضى على اشتغال المضخة الانتشارية فترة زمنية مناسبة.

تزود معظم الاجهزة في الوقت الحاضر بصمام مغناطيسي يوضع فوق المضخة الميكانيكية الدوارة، يأخذ قدرته الكهربائية من طرفي المضخة الميكانيكية فإذا ماحدث اخفاق في تزويد القدره الكهربائية فسيكون جهاز الفراغ محمياً وذلك لإنغلاق الصمام المغناطيسي، وبهذا يتم منع انتقال زيت المضخة الى الجهاز وتلويثه. كما ان له فائدة أخرى هي السيطرة مغناطيسياً على صمام دخول الهواء (inlet) والذي يسمح للهواء بالدخول الى المضخة بعد انغلاق الصمام المغناطيسي حماية للمضخة. يبين الشكل (6-11) وحدة تفريغ أساسية حيث يمكن اعتماد هذه الوحدة لأغراض متعددة. يمكن استخدام أكثر من مضخة انتشارية واحدة كما قد تستخدم أكثر من مضخة ميكانيكية دوارة، كما في حالة جهاز معجل البروتون الخطي.

٨-١١ تطبيقات الفراغ:

يعتبر الفراغ ضروري في اغلب ان لم يكن كل ، الاجهزة الإلكترونية كالمجهر الإلكتروني بكافة انواعه وانبوبة الاشعة السينية وانبوبة أشعة المهبط وبعض عدادات الاشعة (الاشعة السينية أو أشعة كاما) وغير ذلك من الاجهزة التي تستخدم

الحزمة الالكترونية كأساس في عملها. كما يستخدم الفراغ في مجالات أخرى في حقل هندسة المعادن والمواد، على سبيل المثال، مجهر المرحلة الحارة الضوئي (Hot stage Microscope) والافران المفرغة والتي قد تستخدم لصهر بعض السبائك والمواد او للمعاملات الحرارية لبعض السبائك والمعادن. وبصوره عامه يمكن اجمال دواعي استخدام الفراغ الى سببين رئيسيين او اي واحد منهما، اولهما منع التأكسد وثانيهما منع اصطدام الحزمة الالكترونية بجزيئات الغاز الكبيره الحجم نسبة الى حجم الالكترون . يتبين من ذلك انه لا يمكن الحصول على حزمة الكترونية عند وجود جزيئات الهواء وذلك بسبب الإستطارة الشديده الحاصلة من التصادم . وقد صممت كثير من الاجهزة الالكترونية بحيث انها لايمكن ان تصلها القدرة الكهربائية مالم يتحقق فيها الفراغ المطلوب وبصوره اليه كما في المجهر الالكتروني النافذ والمجهر الالكتروني الماسح ومحلل المجس الالكتروني الدقيق و سواها من الاجهزة.

كمايتم استخدام الفراغ في تحضير الاغشية الرقيقة (thin films) للمواد، بصوره عامه، ودراسة خواصها والتي تستخدم بصوره واسعه في حقل الهندسة الالكترونية وخصوصاً في تصنيع الدوائر الالكترونية الدقيقة وأجزاءها.

تمارين الفصل الحادي عشر

- ١- ماهو المقصود بالفراغ وكيف يتم تقسيم مدياته؟
- ٢- ماهو المبدأ الذي تعمل عليه المضخة الميكانيكية الدوارة؟
- ٣- ما فائدة صمام توازن الغازات في المضخة الميكانيكية الدوارة؟
- ٤- اشرح اساس عمل المضخة الانتشارية مع الرسم.
- ٥- لماذا لا تستخدم المضخة الانتشارية لوحدها في تحقيق الفراغ العالي؟
- ٦- ماهي اهم الغايات التي يستخدم من أجلها الفراغ؟
- ٧- ماهي الوسائل المتبعة لوصل التراكيب والأنابيب وصلاً محكماً لتحقيق فراغ عالٍ.

الفصل الثاني عشر

قياس الانهاء السطحي (خشونة السطح)

Measurement of surface finish

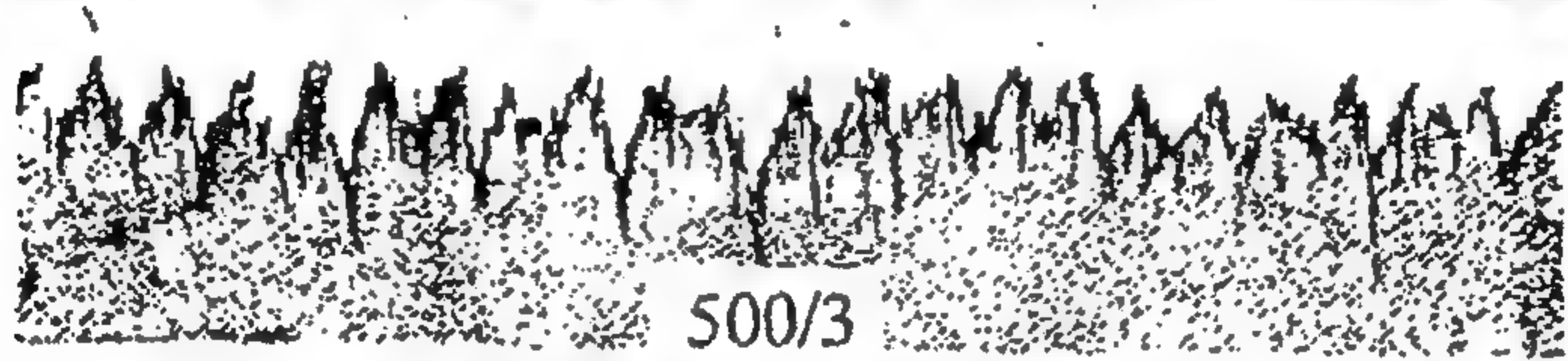
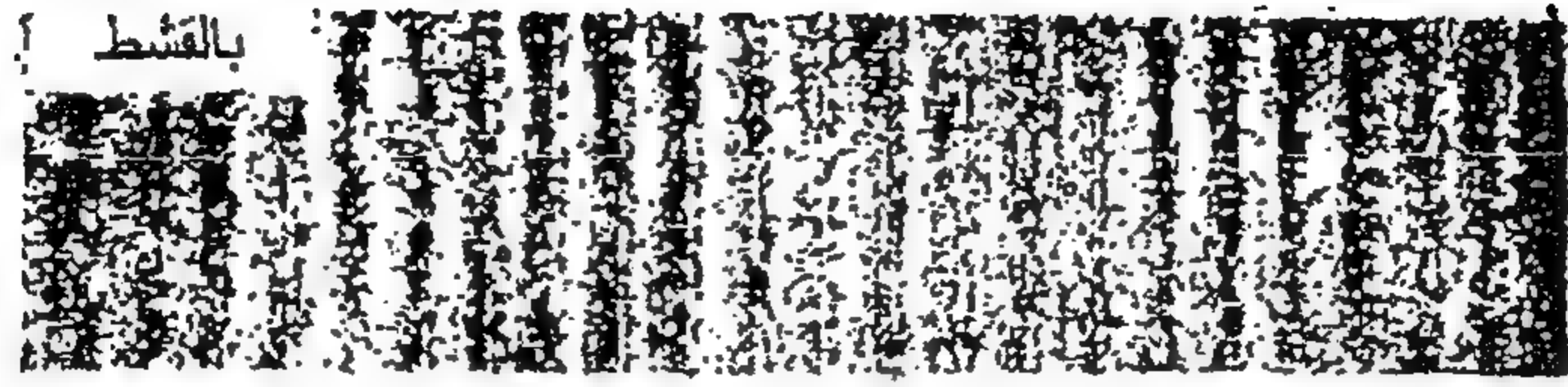
١٢-١ المقدمة Introduction :

الانهاء السطحي (surface finish) او دقة التشطيب هو عدم الانتظام الهندسي في سطح الجزء الناتج من عملية القطع بقلم القطع او من عملية التجليخ او اي عملية انهاء أخرى وليس المقصود هنا درجة لمعان السطح الشكل (1a-12).

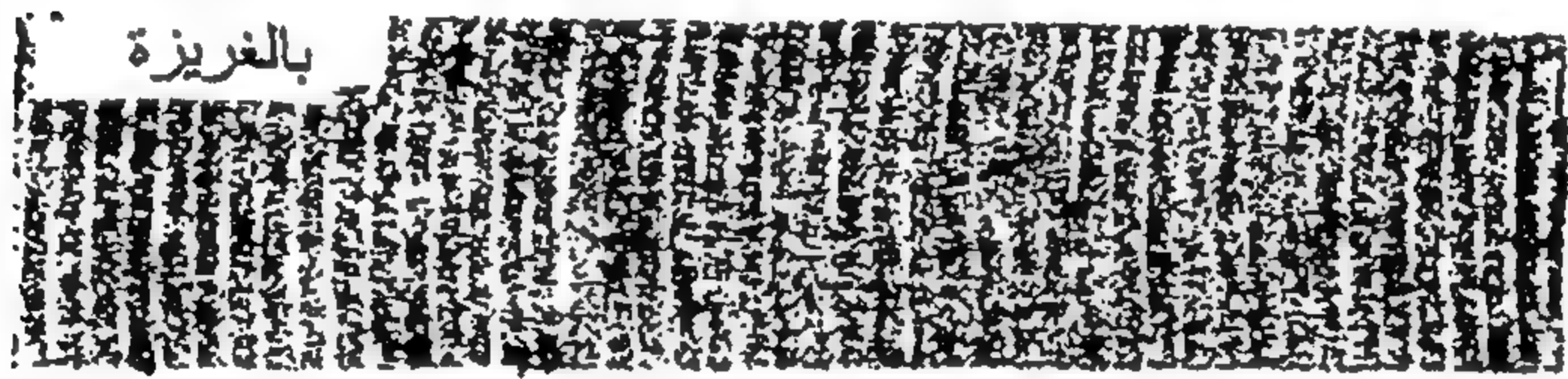
وتختلف درجة انهاء سطوح المشغولات باختلاف طرائق التشغيل والانهاء سواء كانت بماكنات التشغيل او بالسحب (drawing) او بالطرق (forging) او بالدحو (rolling) او بالسبك (casting) او بالطلاء الكهربائي او الخ. كما وأنها تختلف باختلاف عمليات التشغيل والانهاء تبعاً لنوع ودقة ماكنة التشغيل حيث يتراوح مدى الدقة في الانهاء من ماكنات الكشط الكبيره التي تكون فيها التغذية العرضيه حوالي 25mm الى ماكنات الصقل الدقيق التي تكون فيها المسافة بين علامات الخدوش تصل الى مايكرون واحد ($1\mu m$).

ويلاحظ ان ارتفاع التضاريس او النتوءات السطحية (نسج السطح) يكون اقل نسبياً من المسافة بين علامات التغذية (قمم تموجات السطح) حيث يتراوح مقدارها بين $100\mu m$ و $0.04\mu m$.

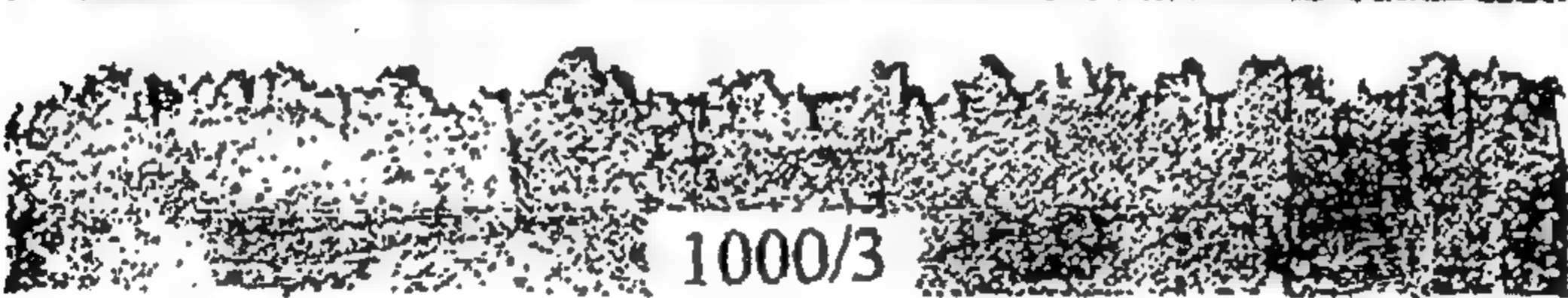
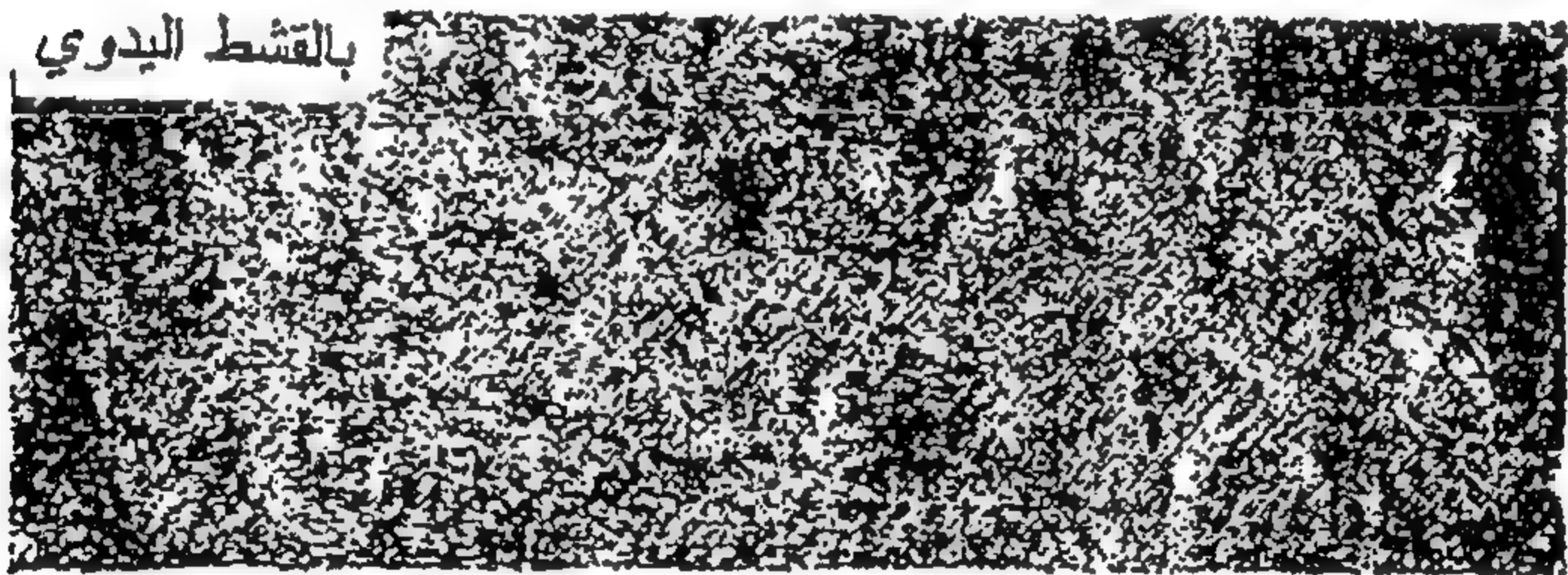
وحيث ان التصميم الهندسي يهدف دائماً للوصول بالانتاج الى الحد الامثل بالنسبة لدرجة الاداء وقوة التحمل وحسن المنظر، وبأقل كلفه، فقد تطلب التطور



$\frac{1}{10 \mu m}$



$\frac{1}{10 \mu m}$



$\frac{1}{5 \mu m}$

شكل (1a-12) صور مكبره لنماذج من السطوح المشغلة امام كل منها نسبة التكبير المستخدمة. وتحت كل منها رسم يمثل المقطع العمودي للسطح (الجانبيه) وبنسب تكبير عاليه (الشاقولي بين 500 ضعف الى 1000 ضعف والافقي ثلاثة اضعاف).

الحاصل في التقنيات ليس فقط تحسين دقة الأبعاد وإنما تحسين دقة نسج أو تضاريس السطح (surface texture) لكل من الأجزاء المشغلة أو غير المشغلة وتأثيرها على الأدوات المستخدمة. وهناك ثلاثة تأثيرات تجعل السيطرة على نسج السطح مهمة جداً وهي عمر الكلال (fatigue life) وخواص الارتكاز (bearing properties) والبلى (wear).

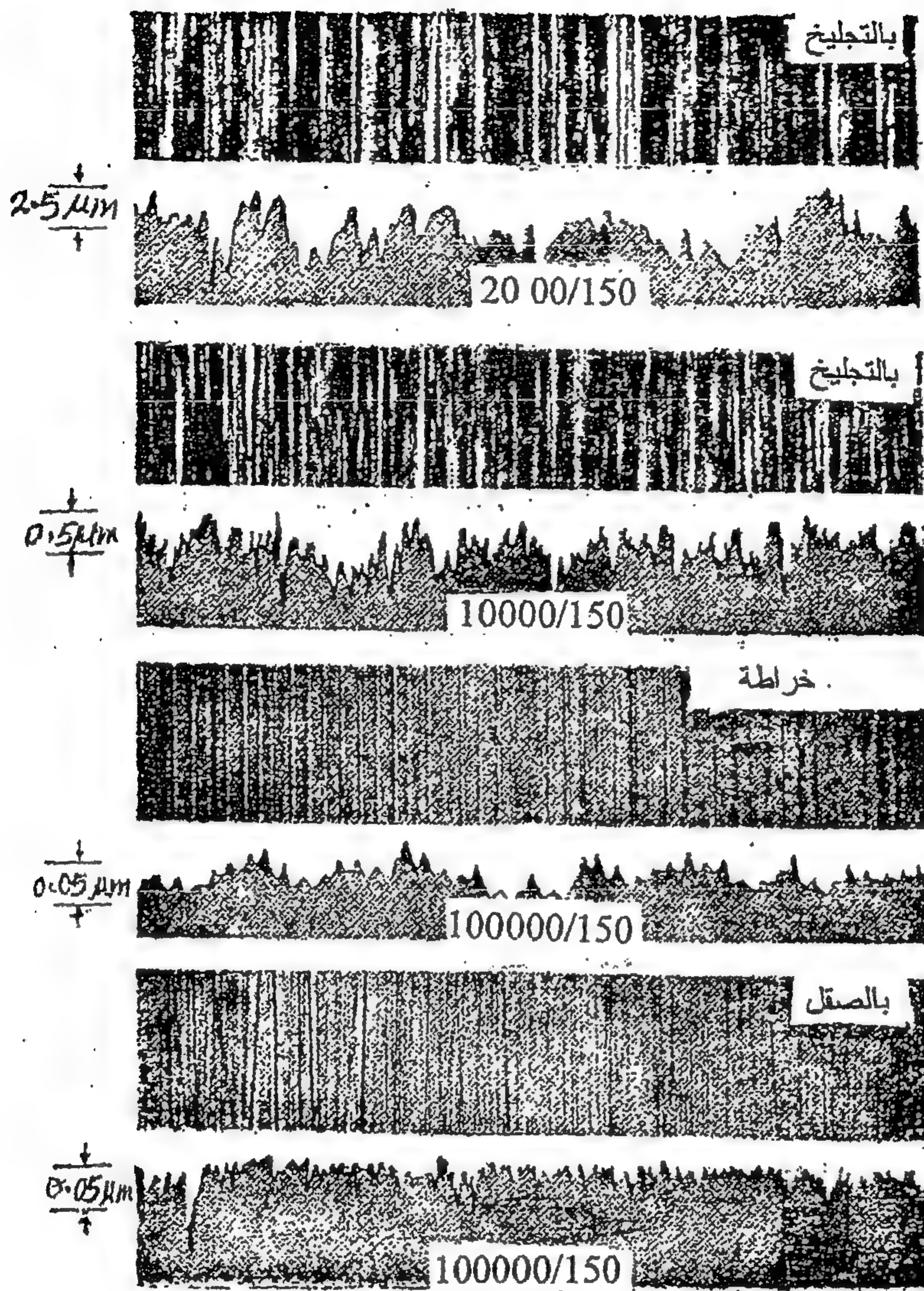
١-١-٢ عمر الكلال Fatigue life :

إذا عرّض جزء ما إلى إجهاد متقلب ومتكرر فسوف يعاني من الكلال وسيكون عمر الجزء أقصر بصورته أوضح مما لو سلط عليه حمل مكافئ ثابت. ويدعى عدد تقلبات الإجهاد الذي يصمد عند (يتحمّله من دون كسر) إجهاد محدد بعمر الكلال (fatigue life). ويبدأ الفشل الناتج عن ظاهرة الكلال دائماً عند الزوايا الحادة، حيث يحصل عندها تركيز للإجهادات وكذلك عند التضاريس السطحية والخدوش حتى ولو كان السطح غير مشغل.

ولقد تبين أن المسمار المعصمي (gudgeon pin) في بعض الماكينات، الذي يحمل الأحمال الدورية، له عمر أطول بكثير إذا كان الثقب الذي يدخل فيه منعماً بصورته أفضل. علماً بأن ثقب المسمار المعصمي لا يكون على تماس مع أي جزء آخر من الماكينة وفي الواقع يكون المسمار المعصمي مجوفاً وذلك لخفض الوزن المعكوس (reciprocating weight).

١-٢-٢ خواص الارتكاز (المرتكزات) Bearing properties

يعتبر السطح تاماً (perfect surface) إذا لم يتضمن عدم انتظام كالتضاريس أو النتوءات ولكنه لا يعتبر السطح الناعم جيداً تماماً (perfect smooth) من ناحية الارتكاز. فهناك احتمال كبير في حصول الالتصاق (seizure) بسبب الصعوبة في المحافظة على غشاء تزييت وبالنتيجة يحدث تماس مباشر بين المعدنين. ولعل أحسن هيئة للسطح الصالح للمرتكزات هو ذلك المبين في الشكل (1b-12) والذي فيه تقلل مساحات التماس الكبيره الاحتكاك حيث تعمل المناطق المنخفضة في بنية السطح على الاحتفاظ بغشاء التزييت.



شكل (1b-12) صور مكبرة لنماذج من السطوح المشغلة امام كل منها نسبة التكبير المستخدمة وتحت كل منها رسم يمثل المقطع العمودي للسطح (الجانبية) وبنسب تكبير عالية (الشاقولي بين 200 و 100000 ضعف والافقي 150 ضعف).

من الثابت في علم الفيزياء ان الاحتكاك لا يعتمد على مساحة التماس الا ان معدل البلى يعتمد على مساحات التماس، فإذا زادت مساحة التماس فسيقل مقدار الحمل لوحدة المساحة ومن ثم يقل معدل البلى .

٢-١٢ ما المقصود بنسيج او تضاريس السطح Meaning of Surface Texture

قبل القيام بأي عملية قياس من الضروري تعريف ماهو الشيء المطلوب قياسه، والواقع لم يكن هذا صعب في الكثير من حالات القياس ولكنه حتى عندما يتم تعريف نسيج السطح لم يكن تحقيق القياس سهلاً.

يعرف التموج (waviness) غالباً بأنه خطأ من النوع الناتج عن هندسة غير دقيقة للعملية التي تنتج السطح او تجرى عليه ولذلك فهي خارج نطاق نسيج السطح. اما الخشونة (roughness) فيمكن تعريفها بعدم الانتظام السطحي الذي لا يمكن تفاديه والناتج من عملية تمت في ماكنة تامة هندسياً على سبيل المثال، عملية القطع او سكينه القطع او عملية التجليخ او عملية تشطيب. وتختلف درجة تشطيب (انهاء) سطوح المشغولات باختلاف طرائق التشغيل والانهاء سواء كان بماكنات التشغيل او السحب او بالطرق او الدحو (rolling) كما أنها تختلف باختلاف عمليات التشغيل والتشطيب تبعاً لنوع ودقة ماكنة التشغيل . يبين الشكل (1a,b-12) بعض نماذج من السطوح المشغلة موضحاً امام كل منها نسبة التكبير المستخدمة ، حيث تمثل الصور المنظر الافقي للسطح مكبراً ثلاثاً اضعاف او مئة وخمسون ضعفاً، وتحت كل منها صورة المقطع العمودي للسطح حيث تتراوح نسبة التكبير في هذه الصور بين الاربع مئة ضعف والخمس وسبعون الف ضعفاً.

ان امكانية عزل وقياس عدم الانتظام هذا هو الذي يعنينا في هذا الفصل من الكتاب .

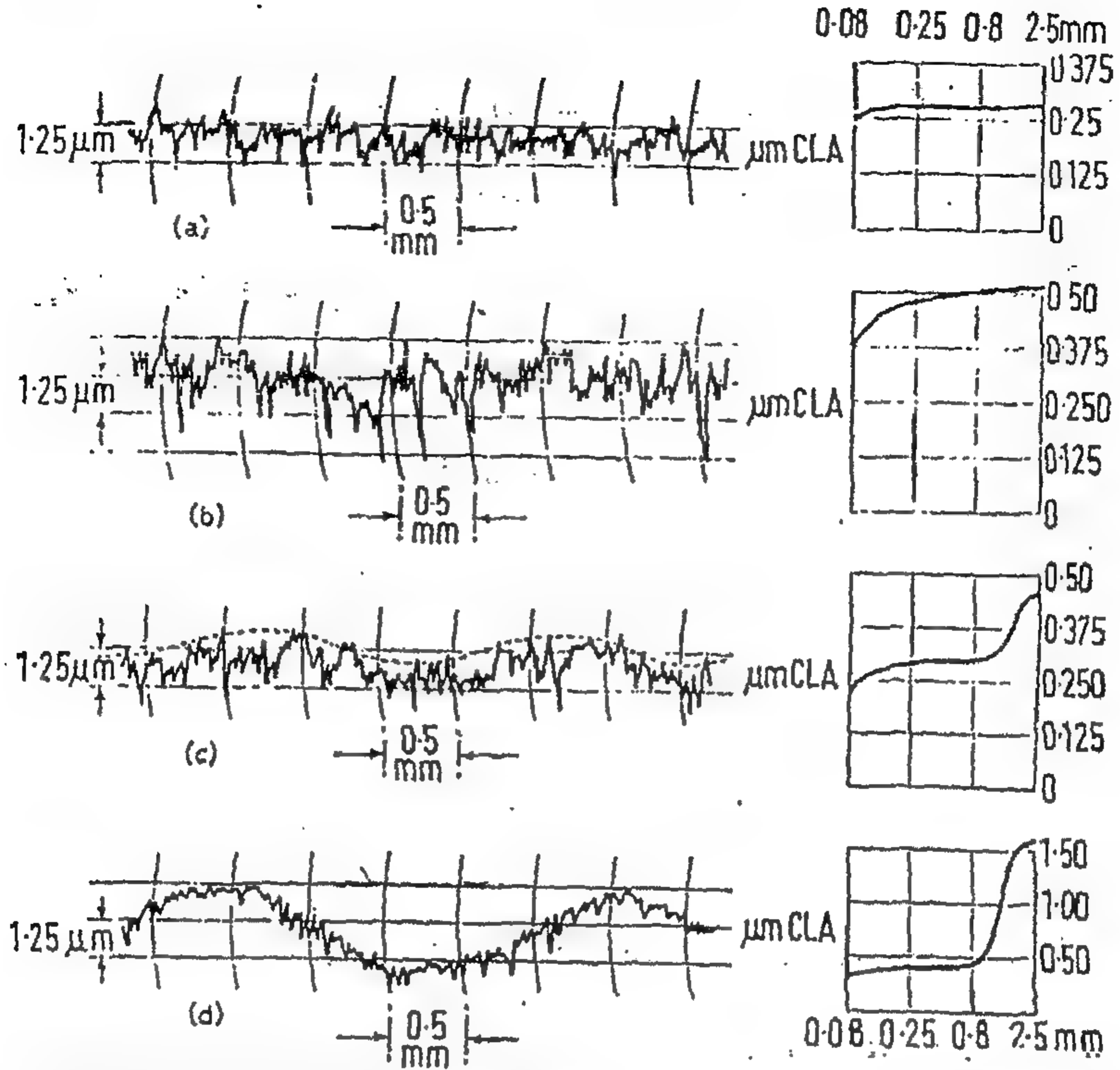
يمكن توضيح الأسلوب الذي يمكن أن تتداخل فيه الخشونة والتموج في أي جزء مشغل إذا تأملنا متطلبات المخرطة (Lathe machine) لعمل جزء أسطواناني تام. فمن الضروري إذن أن تتحرك الأداة بصورة موازية لمحور الدوران. فلو تصورنا أنه في مخرطة ما كان أحد المركزين أعلى من الآخر. فسيؤدي ذلك إلى نشوء سطح بشكل بكره خيوط (bobbin) (الدوران على هيئة القطع الزائد -hyper-boloid revolution). إضافة إلى ذلك فلو لم يحافظ على استقامة حركة الأداة فقد تنشأ سلسلة من الأمواج القصيرة متداخله على شكل منحنى موجي طويل وفوق كل ذلك ستظهر على السطح علامات تغذية الأداة أيضاً. إضافة إلى ما تقدم قد تكون هناك أطوال موجية قصيرة ناتجة عن تذبذب أداة القطع ومن ثم سيحتوي السطح على أربعة أنواع من عدم الانتظام (بغض النظر عن وجود عدم الاستداره) جاعلة الجزء غير أسطواناني بصورة حقيقية. وأسباب هذه هي:

- أ- نتيجة عدم استقامة المركزين (misalignment of centres) وهما سبب
- ب- نتيجة لحركة التغذية غير الخطية (nonlinear feed motion) التاموج
- ج- نتيجة لمعدل تغذية أداة القطع (tool feed rate) وهما سبب الخشونة
- د- نتيجة لتذبذب أداة القطع (tool chatter)

أن فصل التاموج عن الخشونة هو أحد المشاكل في قياس درجة انهاء السطح (surface finish). ولفهم طريقة الفصل هذه يمكن تأمل حقل (ارض زراعية) محروث آلياً، فإذا تم النظر إلى الحقل ككل فإن التاموج هو الغالب. وإذا تم من ناحية ثانية فحص طول محدد، وليكن 30cm، من الحقل حيث يكون التاموج ذو طول موجي مقداره 3m فسوف يتضمن مثالنا جزء قليل من التاموج ومن ثم يمكن التركيز على الخشونة.

وبالتشابه اذا اقتصر الفحص للسطح المشغل على طول قليل (أقل من الاطوال الموجيه) فسوف يتضمن القياس خشونه فقط. لقد عرّف الطول الموجي الاعظم بطول موجة القطع (cut-off-wavelength) وقد تمت معايرته في بريطانيا بموجب المواصفة البريطانية للتقييس B.S.1134 بالأطوال 0.25mm و 0.8mm و 2.5mm حيث يعتمد هذا الانتقاء على السطح المراد فحصه. فإذا لم يحتوي السطح على تموج فسيتم الحصول على نفس قيمة الانهاء السطحي مهما كان الطول المفحوص للسطح، كما يظهر في الشكل (2a-12). فإذا ازدادت قيمة التموج فإن القيمة العددية لتضاريس السطح سوف تزداد ايضاً كلما ازداد طول الموجه كما مبين في الشكل (2b, c,d-12) كل هذه الاشكال تمثل نماذج منعمة (ground specimens) وبدرجات مختلفة من آثار تذبذب اداة التنعيم.

يكون الطول المفحوص او طول القطع 0.8mm عادة للسطوح المنعمة. اما بالنسبة للأجزاء القصيرة، على سبيل المثال، حلقات المكبس (Piston rings) فيكون الطول 0.25mm هو الاكثر ملائمة لفحص نسيج السطح لأن في مثل هذه الاجزاء القصيرة لا يتضمن السطح تغيراً في تضاريسه على مدى المسافات البعيده نسبياً. وكقاعده عامة لقياس نسيج (تضاريس) السطح المشغل بأداة نقطيه فيجب ان لايزيد طول موجه القطع (cut-off wavelength) عن المسافه البينيّه للتغذية.



الشكل (2-12) تأثير طول موجة القطع على التخمين الرقمي لانتهاء السطح.

٢-٣ طرق قياس الانتهاء السطحي

: (Methods of Measuring Surface Finish)

تتوفر عدد من طرق قياس الانتهاء السطحي للجزء المشغل وهي بصورة عامة

تصنف الى صنفين هما:

أ- طرق المقارنة.

ب- طرق القياس المباشرة

تعتبر طرق المقارنة محاولات لتخمين نسيج السطح بواسطة مشاهدة السطح او الإحساس به. ومن الضروري ان تكون المقارنة مع سطح مماثل لأن هذه الطرق تؤدي الى نتائج خاطئة اذا لم تتم المقارنة مع سطوح مشغلة بتقنيات متشابهة. ان

مظهر السطح يعتمد بصورة كبيرة على نمط الخدوش واتجاه الخدوش ويتأثر بصورة أقل بعمق هذه الخدوش. وهذه الحقيقة تنطبق على الفحص المجهرى أيضاً، كما في (3-12) الذي يمثل التكبير المجهرى لسته سطوح مختلفة حيث تبدو جانبيه السطح (Surface profile) كما مبين بالآثار المرسومة لكل صورة.

ولعل طريقة تخمين نسج السطح باللمس هي افضل من المشاهدة العيانية وقد تؤدي هذه الطريقة الى نتائج خاطئة اذا لم تتم المقارنة بين سطوح مشغلة بطرائق متشابهة. وقد تم توفير معايير مقارنة قياسية للسطوح من قبل الشركات على سبيل المثال، روبرت وشركاه (Rubert & Co.) في ما نجستر وعمليات تشغيل مختلفة في حين صنعت شركات اخرى مثل شركة نورتن لدواليب التنعيم (Norton Grinding Wheel Co.) اسطوانات منعمه قياسية.

لقد تم تطوير طرائق قياس مباشرة للتمكين من وضع قيم عديده للإنهاء السطحي وكل هذه التقنيات تقريباً هي من نوع اجهزة مجس المرقم (stylus probe type) اضافة الى طرائق التداخل الضوئي (Interfero metric methods) التي تكون ملائمة للسطوح العاكسة.

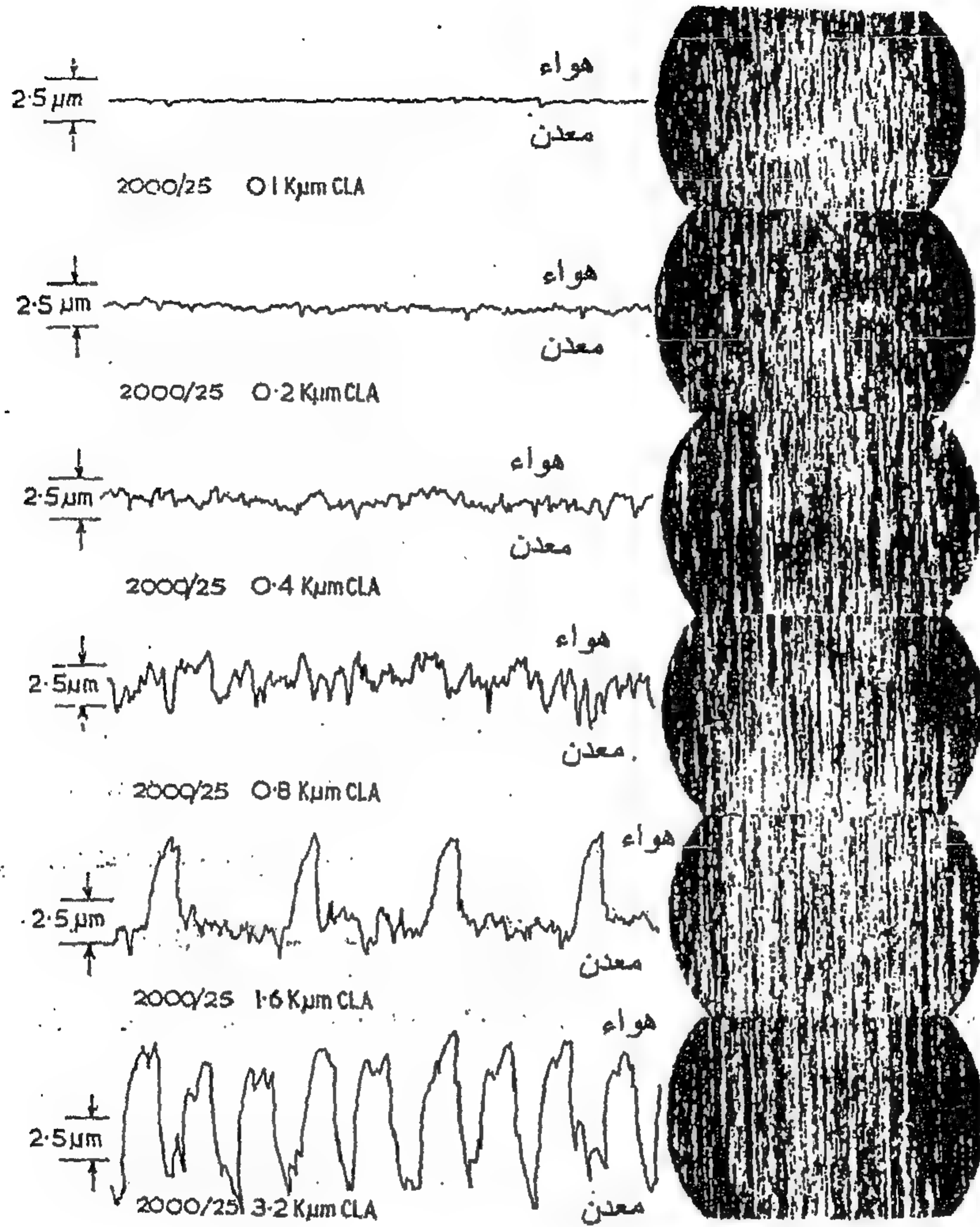
١-٣-١ اجهزة مجس المرقم (Stylus Probe Instruments) :

يمكن تقسيم اجزاء الاجهزة من هذا النوع. في كل الحالات تقريباً، الى الوحدات التالية :

أ- منزلق او حذاء ينسحب ببطء على السطح ويتتبع وضعه بصفة عامه وهكذا يزودنا بالمعلومات.

ب- مرقم او مجس يتحرك على السطح مع المنزلق ويصوره عموديه بالنسبة الى المنزلق وهذه الحركة ناتجة من خشونة السطح.

ج- جهاز لتضخيم حركة المرقم.



الشكل (3-12) سطوح ذات منظر متشابه، نظراً لشدة تقارب خطوط التغذية إلا انها تمتلك صفات انهاء مختلفة يصوره كبيره. التكبير الشاقولي 2000 ضعف والافقي 25 ضعف. ملاحظة: الحرف K هنا يعني ان طول موجة قطع مقداه 0.8mm قد تم استخدامه.

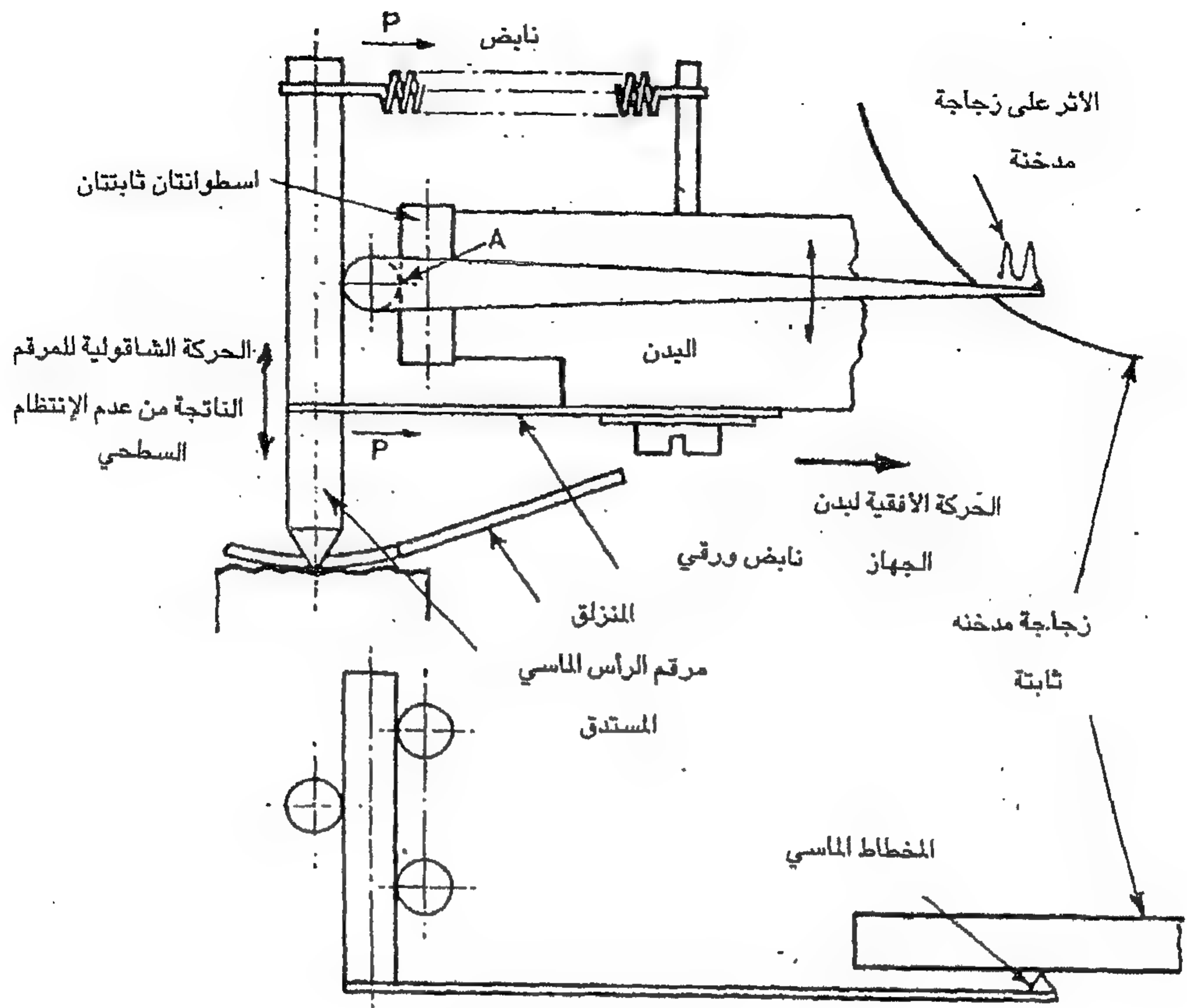
د- جهاز التسجيل لتكوين أثر او تسجيل لجانبية السطح. والذي يجب ملاحظته هنا هو ان كل التسجيلات او الآثار تكون مشوهة اي ان مقدار التكبير الافقي يختلف عن التكبير العمودي، وذلك للتمكن من إظهار المعالم العمودية على الاثر بصورة جلية ولطول معقول . فإذا تم تكبير طول قياس مقداره 0.8mm خمسة آلاف ضعف فسيلازم للأثر الناتج طولاً مقداره 4m .

هـ- وسائل لتحليل منحنى الجانبية الناتج . ويمكن ان تكون هذه الوسائل من ضمن الجهاز او قد تكون بصورة منفصلة عنه. يمكن لاجهزة ذات انظمة تكبير ميكانيكية او الكترونية ان تحقق هذه الصفات او الاهداف.

٢-٣-١٢ مقياس السطح لتوملينسن: (Tomlinson surface Meter)

تستخدم في هذا الجهاز طرائق التكبير الضوئي الميكانيكي (Mechano- Op- tical Magnification) ، وقد تم تصميمه من قبل الدكتور توملينسن من مختبر الفيزياء الوطني . يبين الشكل (4-12) الاجزاء الرئيسة له . فيتصل الحذاء بجسم الجهاز حيث يضبط ارتفاعه وذلك لجعل الابره الماسية تتموضع بصورة ملائمة. يتم تقييد المرقم من كل أنواع الحركة عدا الحركة العمودية بواسطة نابض ورقي وآخر حلزوني . فالشد في النابض الحلزوني "P" يؤدي الى شد مشابه في النابض الورقي . حيث تمسك هذه القوى الاسطوانة المستعرضة بين المرقم من جهة واسطوانتين ثابتتين متوازيتين من جهة أخرى كما هو مبين في الشكل التخطيطي . وقد ربط في الاسطوانة المستعرضة ذراع نابضي خفيف من الفولاذ يحمل فوق نهايته ابره ماسية تؤثر في حاجز زجاجي مدخن.

ويعمل الجهاز عند سحب الجسم بهدوء عبر السطح المراد تقييم خشونته بواسطة لولب يدور دوره واحد في الدقيقة وبمحرك (ماتور) متزامن حيث تبقى الزجاجه مستقرة.



الشكل (4-12) مقياس السطح لتوملنسون.

يسبب عدم الانتظام في السطح حركة عموديه للمرقم والذي يجعل الاسطوانة المستعرضة تتحرك دائرياً حول النقطة (A) حيث يؤدي الى تكبير حركة الابر الماسية المحمولة على الذراع. تزدوج هذه الحركة مع الحركة الافقيه لتوليد الاثر على الزجاجه وبتكبير مقداره مئة ضعف بالاتجاه العمودي ولايوجد تكبير للأثر بالاتجاه الأفقي.

ينقل الاثر المتكون على الزجاج المدخنة بواسطة الاسقاط الضوئي على حاجز ابيض حيث يتم تكبيره خمسون ضعفاً اضافياً وبذلك يكون مجمل التكبير العمودي هو خمسة آلاف ضعف والتكبير الافقي خمسون ضعفاً. وعندئذ يمكن رسم الاثر باليد او بطرق التصوير الضوئي ثم يتم تحليله.

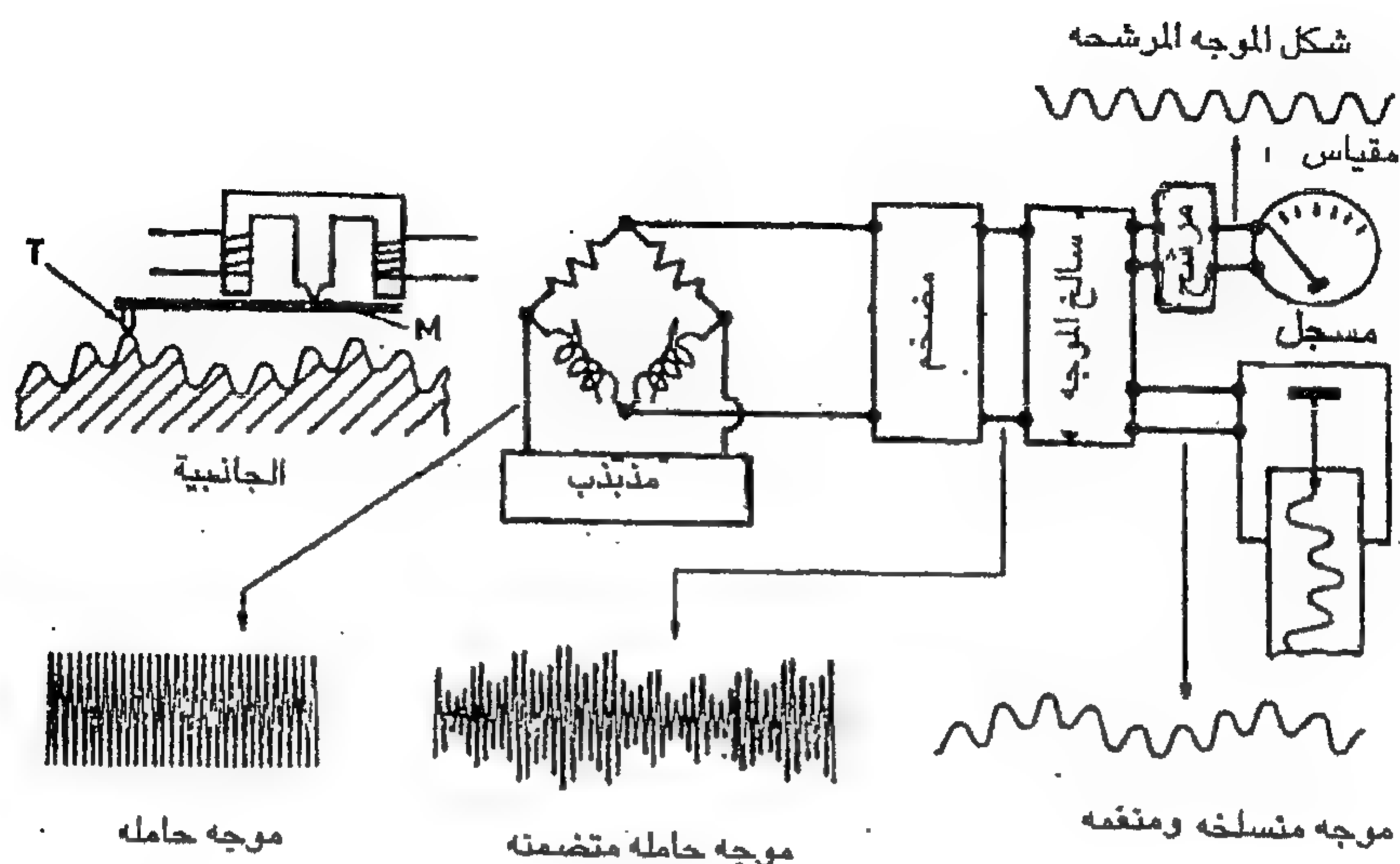
٣-٣-١٢ جهاز تيلور وهوبسون (تيليسيرف):

Taylor - Hobson "Talyurf"

ان التيليسيرف جهاز الكتروني . ويمكن ان يعتبر اساس عمل الجهاز مشابهاً لجهاز توملنسن وهو يفرق عنه بالدرجة الاساس في طريقة التكبير. فهو يعطي نفس المعلومات لكن بسرعة اكبر وربما بدقه أعلى ايضاً. وهو يمكن ان يستخدم في المصنع وفي المختبر على حد سواء، إلا أن جهاز توملنسن مصمم أساساً للإستخدام في المختبر.

يتكون رأس المقياس ، كما هو الحال في جهاز توملنسن ، من المرقم وضابط الحركة (T) الذي يُسحب عبر السطح المراد فحصه بواسطة محرك كهربائي وصندوق تروس، يشكل الذراع الحامل للمرقم (stylus) في هذه الحالة ، حافظه مغناطيس (armature) والذي يدور حول الجزء المركزي على شكل حرف (E) (يتكون من شرائح فولاذية مصفوفة على بعضها) حيث يُكف على كل ذراع من الذراعين الخارجيين ملف يمر به تيار متناوب (A.C) كما في الشكل (12-5) .

فعندما تدور حافظه المغناطيس حول النقطة M فستؤدي الى تغير الفسحتين الهوائيتين وكنتيجه لذلك تتغير سعة التيار المتناوب الاساس المار في الملفين. حيث ان هذه التشكيله تكون جزء من قنطرة الدائرة التي مخرجاتها تتألف من الاشارة المعدله فقط. تغذى الاشاره المعدله الى جهاز تضخيم وهذا يؤدي الى ان يعمل قلم المسجل ليكون تسجيلاً دائماً اضافه الى المقياس الذي يعطي تخميناً رقمياً مباشراً.



شكل (5-12) رسم تخطيطي لجهاز تيلر - هيسون (تيليسيرف).

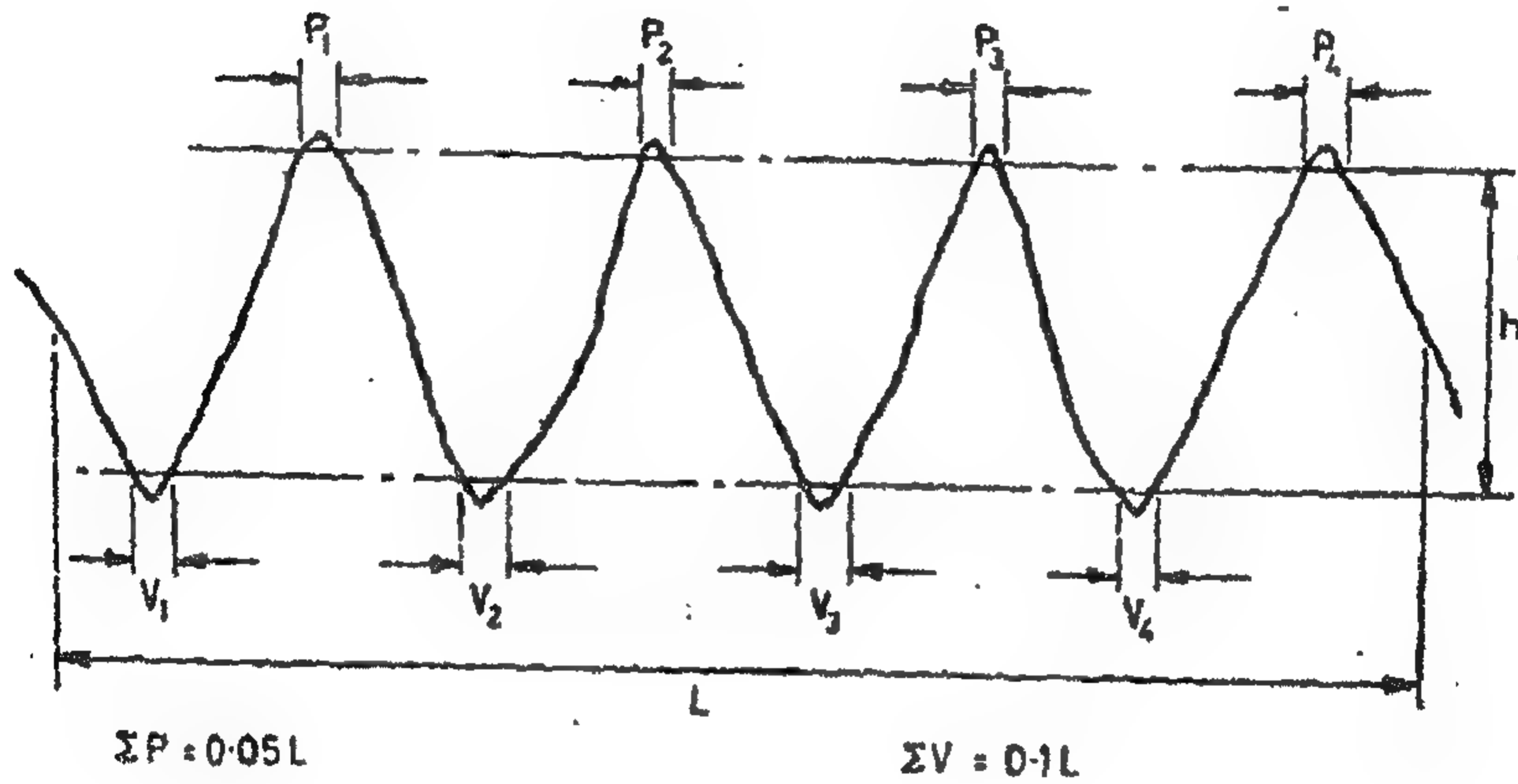
٤-٢ تحليل آثار السطح : Analysis of Surface Traces

يتم تحديد التخمين الرقمي للسطح ليشير الى درجة نعومته (أو خشونته) باستخدام عدد من الطرائق . فتستعمل تقنيات مختلفة في البلدان المختلفة فعلى سبيل المثال تستخدم المملكة المتحدة وبعض أقطار الكومنولث (Commonwealth) والولايات المتحدة الأمريكية (منذ سنة 1955) طريقة معدل الإرتفاع (Average height) في حين تستخدم السويد وعدة أقطار أوروبية قيمة الإرتفاع بين القمة والقعر بينما تستخدم الأقطار الأخرى قيمة جذر معدل التربيع (Root mean square value).

١-٤-١٢ طريقة الارتفاع بين القعر والقمة (Root to Valley Height) :

يشير اسم هذه الطريقة (الارتفاع بين القعر والقمة) الى أسلوب بسيط نسبياً في التحليل، لكنه اذا تم التفسير بمجاله الواسع فهو يعني ان القمة والقعر المستخدمه سوف تكون نادرة الاستخدام وبصوره لا تقبل الشك تقريباً وان القيمة الحاصلة تخميناً سوف لا تمثل السطح .

وللتغلب على هذه المشكلة فإن ارتفاع القعر - قمه يعرف بأنه المسافة بين زوج من الخطوط المتوازية لكان معين من الاثر موضوع بحيث تكون المسافات التي هي ضمن القمم في الاعلى تساوي 5% من طول خط الاثر وان المسافات التي تقع ضمن القعور في الاسفل تساوي 10% من طول خط الاثر . وقد تم تمثيل ذلك في الشكل (6-12) .



شكل (6-12) التمثيل بالمنحنى بين القمة الى القعر.

٢-٤-١ قيمة جذر معدل المربعات (Root Mean Square Value) :

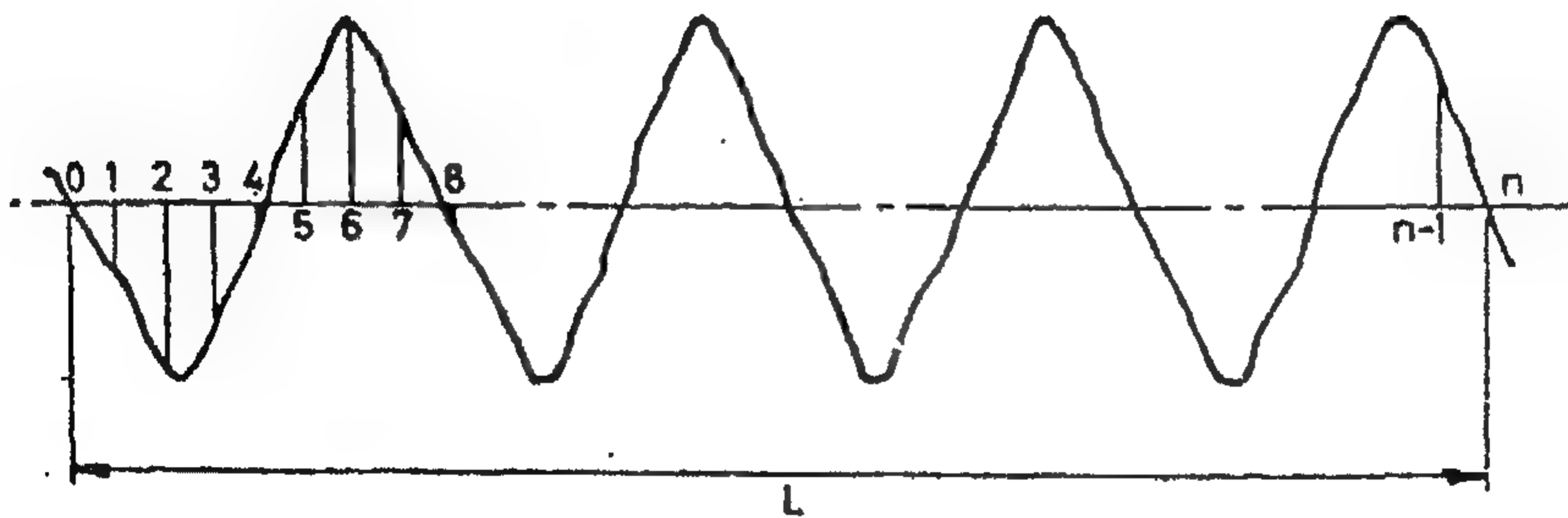
كانت هذه الطريقة قياسية حتى سنة 1955 في الولايات المتحدة الامريكية والتي تم بعدها اعتماد طريقة ارتفاع المعدل (الطريقة 3-4-12) في القياس . وتعرف الطريقة اعلاه بأنها قيمة الجذر التربيعي لمعدل المربعات للإبعاد الشاقوليه التي تقاس من خط وسطي.

ولو تم تأمل الشكل (7-12) وعند فرض ان الابعاد الشاقوليه (h_s) متساوية المسافة البينييه وقائمة عند المواضع المرقمه 1 و 2 و 3 و.... و n والتي ارتفاعاتها h_1 و h_2 و h_3 و..... و h_n على التوالي فإن

$$h_{r.m.s} = \sqrt{\frac{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 + \dots + h_n^2}{n}} \quad \dots\dots\dots(1-12)$$

أو أن

$$h_{r.m.s} = \left\{ \frac{1}{L} \int_0^L h^2 dL \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots(2-12)$$



شكل (7-12) التمثيل بالمنحنى لجذر معدل المربعات.

٣-٤-١٢ طريقة معدل خط المركز (Centre Line Average Method):

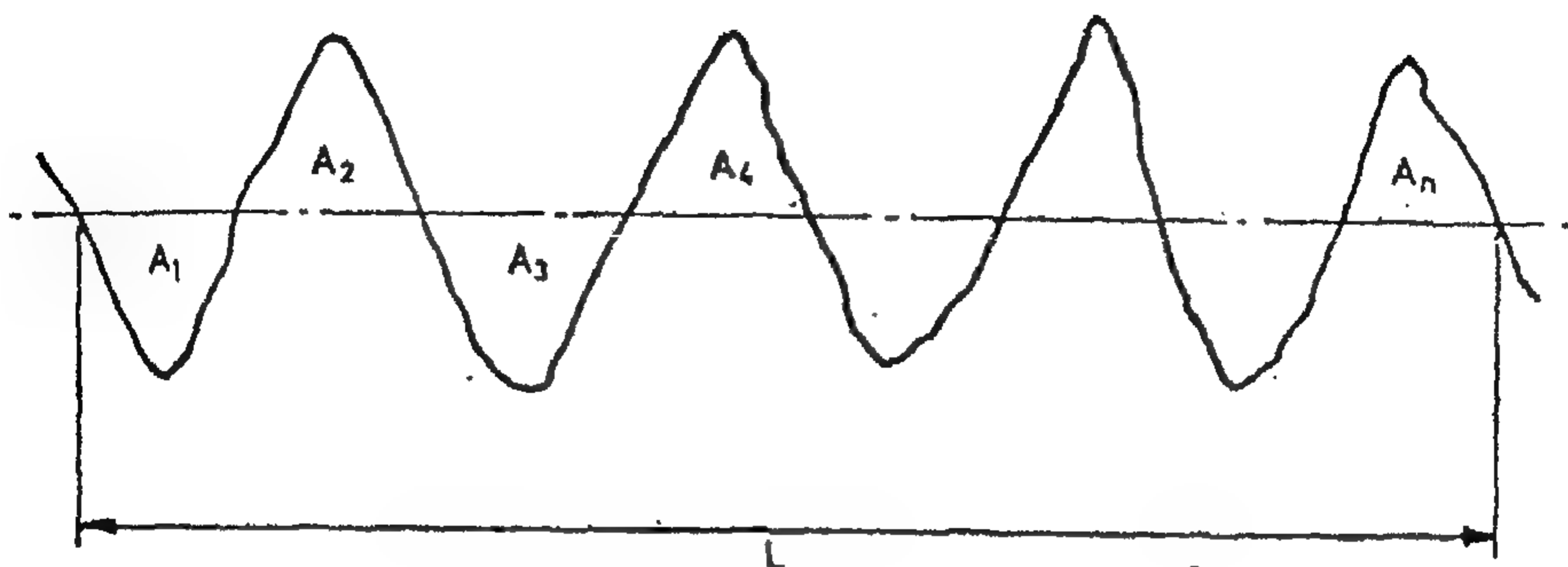
تعتبر قيمة معدل خط المركز (C.L.A) قياسية وقد اعتمدت في بريطانيا ومنذ سنة 1955 تم اعتمادها في الولايات المتحدة ايضاً كما مر ذكره. ويمكن تعريفها بأنها معدل الارتفاع من خط وسطي، و لكل الابعاد الشاقوليه على السطح بغض النظر عن اشارتها. ولذا تكون قيمة C.L.A عند الرجوع الى الشكل (7-12) الآتي:

$$C.L.A = \frac{h_1+h_2+h_3+h_4+.....h_n}{n} \quad \text{..... (3-12)}$$

$$= \frac{\sum h}{n}$$

يتطلب تعيين قيمة معدل خط المركز (C.L.A.) بوساطة اقامة اعمدة شاقوليه جهداً كبيراً حيث يعتبر ذلك عملاً صعباً وممل. و اذا تم اختيار مسافات غير موفقه بين الاعمدة فإن نقاطاً مهمة على السطح قد تهمل . ولذلك لو قسمت المساحة غير المنتظمة على الطول الموجي الخاص بها فإن القيمة الناتجة هي الارتفاع المعدل للمساحة. ويمكن قياس مثل هذه المساحة باستخدام المساح (Planimeter)، فلو تم تأمل عدد غير محدود من الاحداثيات الشاقوليه، وان تؤخذ في الاعتبار كل نقطة على السطح . وبالإشارة الى الشكل (8-12) يمكن ملاحظة ان الخشونة

$$C.L.A. = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + + A_n}{L}$$
$$= \frac{\sum A}{L}$$



شكل (8-12) التمثيل بالمنحنى لمعدل خط المركز

لذلك تكون القيمة التي يتم الحصول عليها هي معدل ارتفاع الاثر. وللحصول على قيمة C.L.A. للسطح المعين فمن الضروري ان تقسم هذه القيمة على مقدار التكبير الشاقولي للأثر ومن ثم ضربها في 10^3 لنحصل على القيمة بالميكروميتر

$$C.L.A = \frac{\sum A}{L} \times \frac{10^3 \mu m}{\text{مقدار التكبير الشاقولي}}$$

حيث تمثل

$\sum A$ = مجموع المساحات فوق وتحت خط الوسط بالمليميتر المربع (mm^2).

L = طول خط الوسط بالمليميتر (mm).

ومن الضروري قبل البدء بمثل هذه القياسات تحديد موضع خط الوسط بحيث ان المساحات التي تقع فوقه وتحتة تكون متساوية وبتفاوت مقداره 5%. يمكن عمل هذا الشيء بالآتي:

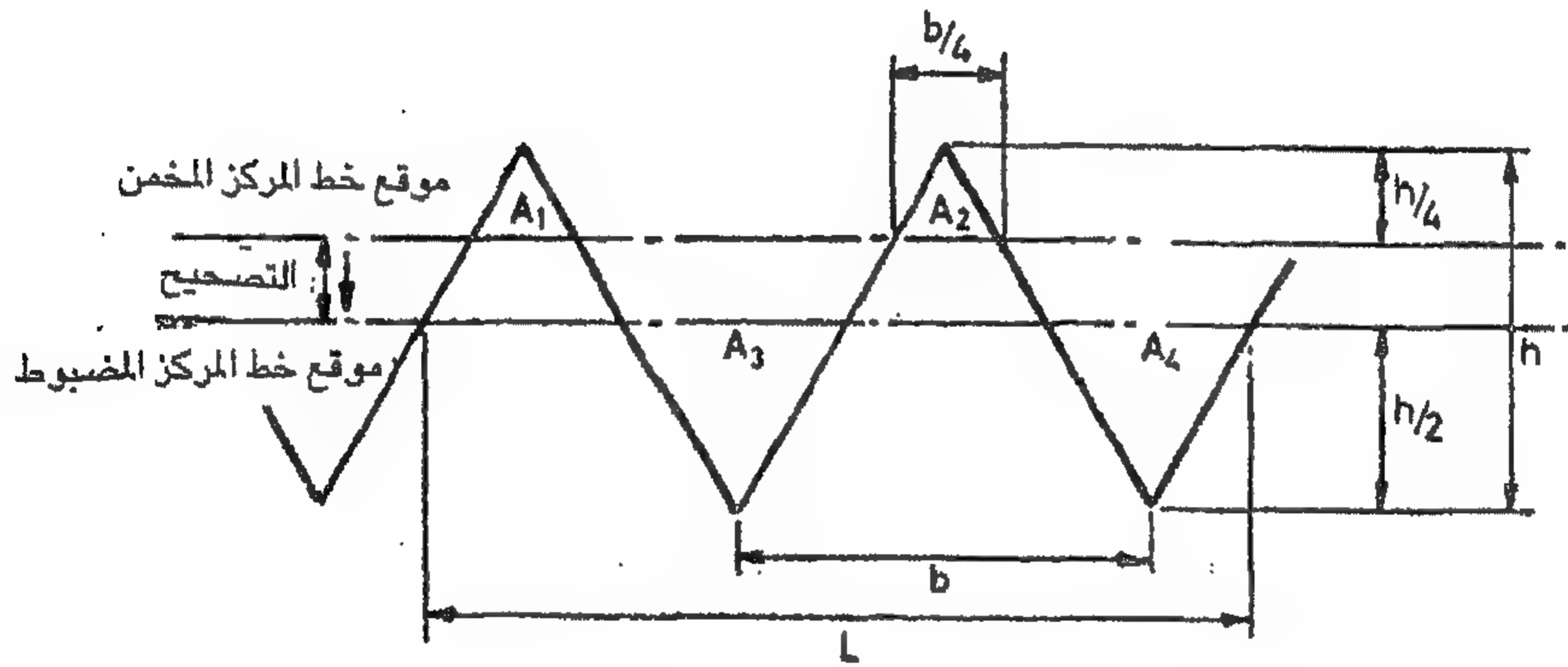
أ- تخمين موضع الخط بالعين.

ب- قياس مجموع المساحات فوق وتحت موضع الخط المخبّن.

ج- يصحح موضع الخط بمقدار يساوي الفرق في المساحات (الفوق والتحت) مقسوماً على طول خط الاثر.

$$\text{مقدار التصحيح} = \frac{\text{مجموع المساحات العلوية} - \text{مجموع المساحات التحتيه}}{\text{طول الخط (L)}}$$

يمكن شرح هذه الطريقة بالرجوع الى الشكل (9-12) والذي يمثل سطحاً ذو نتوءات مثلثة الشكل.



الشكل (9-12) تصحيح المكان المخبّن لخط المركز لهيئة سطح منتظمة.

ولنفرض ان خط الوسط المخمن مرسوم على مسافة $\frac{h}{4}$ من القمم. عندئذ يكون مجموع المساحة فوق الخط المخمن

$$A_2 + A_1 =$$

$$2 \cdot \frac{h}{4} \cdot \frac{b}{4} \cdot \frac{1}{2} =$$

$$\frac{hb}{16} =$$

أما مجموع المساحة تحت الخط المخمن $A_4 + A_3 =$

$$\frac{9hb}{16} = 2 \cdot \frac{3h}{4} \cdot \frac{3b}{4} \cdot \frac{1}{2} =$$

$$\frac{\text{المساحة العلوية} - \text{المساحة التحتية}}{\text{طول الخط}} = \text{فالتصحيح}$$

$$\frac{h}{4} = \frac{\frac{9hb}{16} - \frac{hb}{16}}{2b} =$$

اي ان مسافة التصحيح التي يجب ان يزاح بها اثر خط الوسط هي $\frac{h}{4}$ الى الاسفل (وهذا ما تعنيه علامته السالبة، أما إذا كانت القيمة موجبة فيعني ان الخط يجب ان يزحف الى الاعلى).

وهذا يجلب الخط الى المسافة $\frac{h}{2}$ من بداية القمم والذي سيكون عند وضعه المضبوط.

ان هذه العملية صحيحة من الناحية الهندسية للشكل المنتظم من هذا النوع وهي تقريباً صحيحة للشكل غير المنتظم من النوع الذي يصادفنا في تسجيل تضاريس السطح.

ان التقنية التي تم شرحها آنفاً هي تلك التي يلزم اجرائها في حالة استخدام جهاز توملنسن . اما مقياس التيليسيرف (Talysurf) الاعتيادي فيتضمن دائرة الكترونية تكاملية هي التي تقوم بهذه المهمة اثناء سحب المجس على طول السطح.

٥-٢ مجهر التداخل الضوئي (The Interference Microscope)

لو وضع مسطح ضوئي* (optical flat) بزاوية صغيرة على سطح عاكس مسطح، ثم تضاء المنظومة بحزمة ضوئية متوازية احادية الطول الموجي فسوف تشاهد أهداب التداخل (interference fringes) عبر السطح. يعتبر انعطاف هذه الاهداب كمقياس لتسطح السطح وإذا كان الطول الموجي للضوء المستخدم معلوماً فيمكن عندئذ معرفة التسطح والى درجة عالية من الدقة. فلوتأملنا التأثير الحاصل في منظر سطح يحتوي على اخدود على شكل الحرف (V) وبعمق $0.1\mu\text{m}$ وواقع تحت المسطح الضوئي وباستخدام حزمة ضوئية ذات طول موجي مقداره $0.5\mu\text{m}$. فسيشير مقدار عدم الانتظام في نمط اهداب التداخل الى عمق الاخدود كما هو مبين في الشكل (10-12).

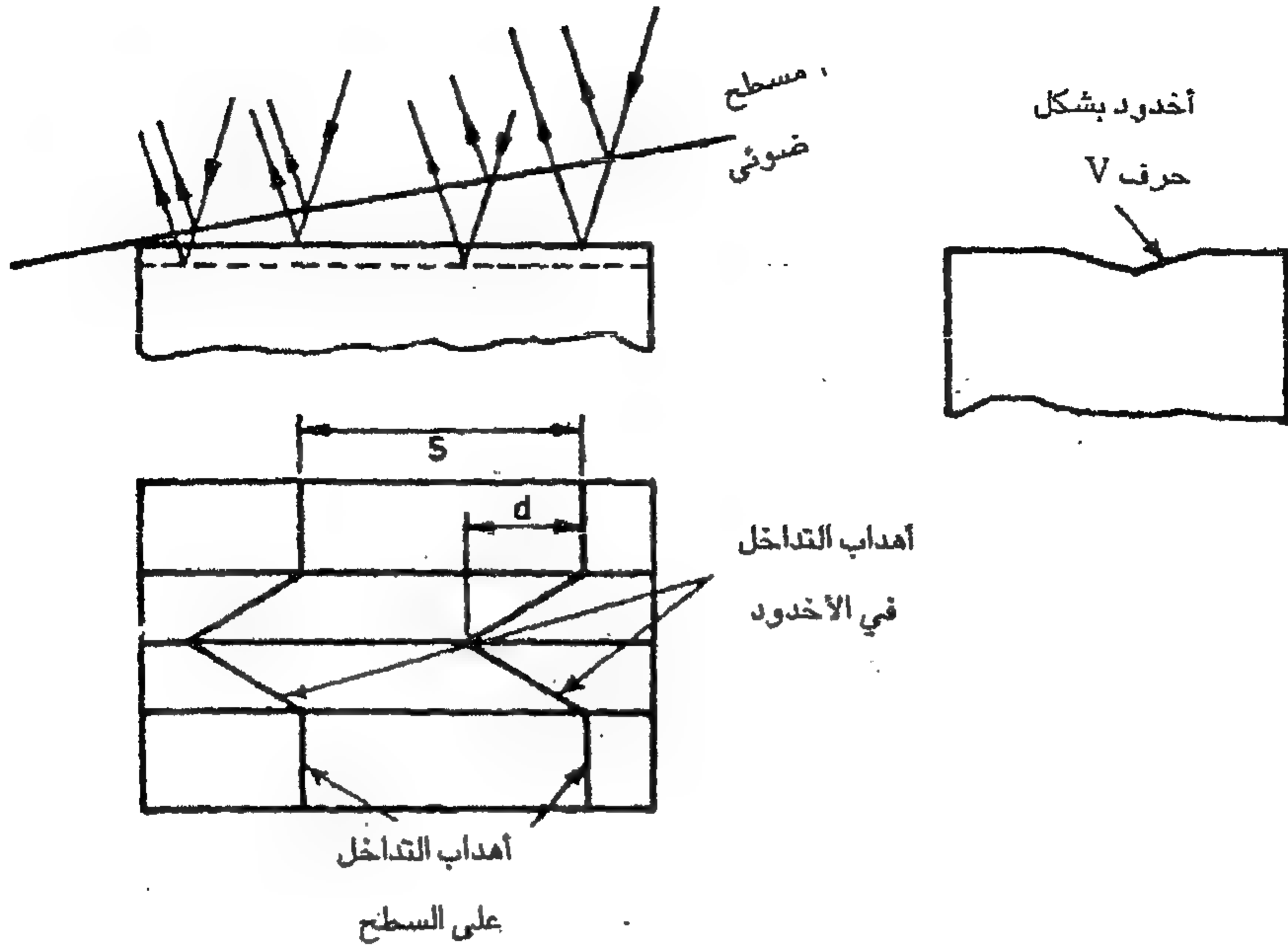
تمثل المسافة بين الاهداب التغير في المسافة بين السطح و المسطح الضوئي لنصف طول موجي $\frac{\lambda}{2}$.

$$\frac{\lambda}{2} \times \frac{d}{s} = \text{اذن عمق الاخدود}$$

وفي هذه الحالة فإن العمق 0.1 mm

$$\frac{d}{s} = \frac{0.1}{0.25} \times \frac{0.5}{2} \quad \text{اذن:} \quad 0.5\mu\text{m} = \lambda$$

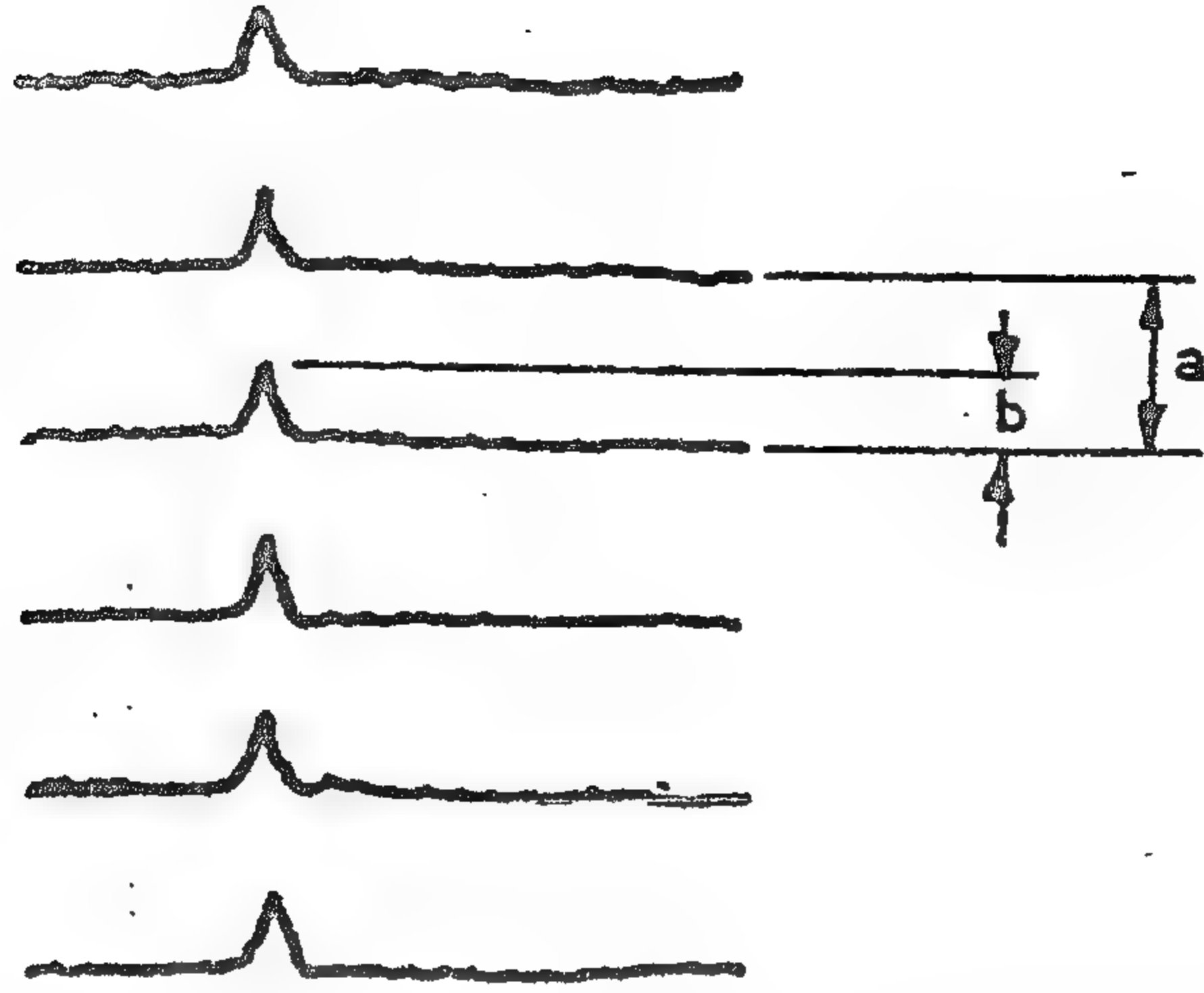
* المسطح الضوئي هو قرص زجاجي خال من الاجهادات . أحد وجهيه او كلاهما منعم ومصقول وملمع الى درجة من التسطح (flatness) لا تتوفر عادة في السطوح الهندسية. لذلك يعتبر المسطح الضوئي مصدر قياسي للتسطح ولهذا يقارن تسطح السطوح الهندسية به. يتراوح قطره بين 50 الى 300mm اما سمكه فهو 50mm تقريباً لأكبر قطر.



شكل (10-12) أهداب تداخل عبر سطح مسطح يتضمن أخدود غير عميق على هيئة (V) وعلى طول السطح.

وهذا يعني ان عدم الانتظام في الأهداب المعبر عنه بجزء من المسافة الفاصلة بين هذين، يشير الى عمق عدم الانتظام في السطح بدلالة نصف الطول الموجي للضوء المستخدم.

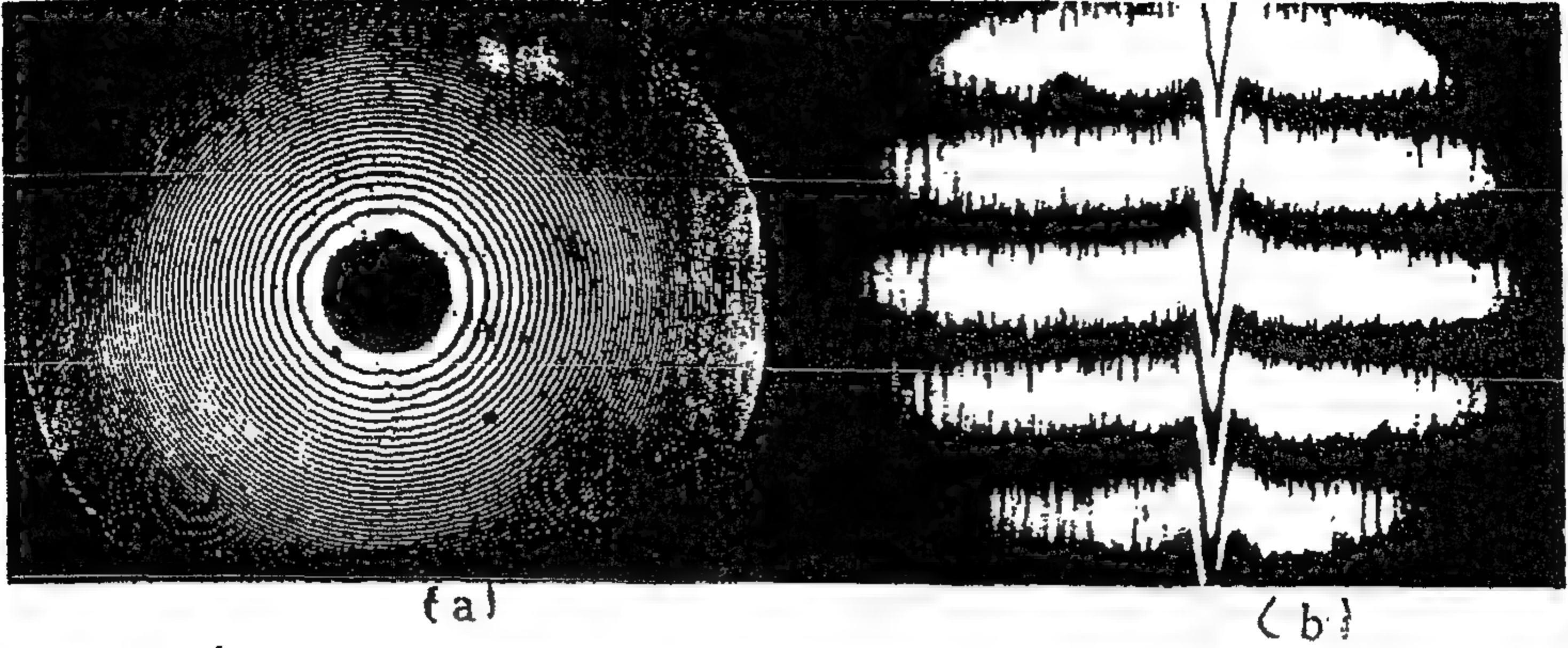
ويظهر السطح، كما مبين في الشكل (11-12)، بصورة عامه له مسافة بين الأهداب تساوي (a) ويظهر الخدش (الأخدود) كما يبدو وكعدم انتظام في الأهداب وان له ارتفاع مقداره (b).



شكل (11-12) شكل نمط الاهداب الذي يُظهر خدش في السطح المسطح . يبدو في الشكل (11a-12) نمط مجهري حقيقي لاهداب مثل هذا السطح.

يكون عمق الشق اذن مساوياً للمقدار $(\frac{b}{a} - \frac{\lambda}{2})$ مايكرومتر حيث تمثل λ طول موجة الضوء المستخدم.

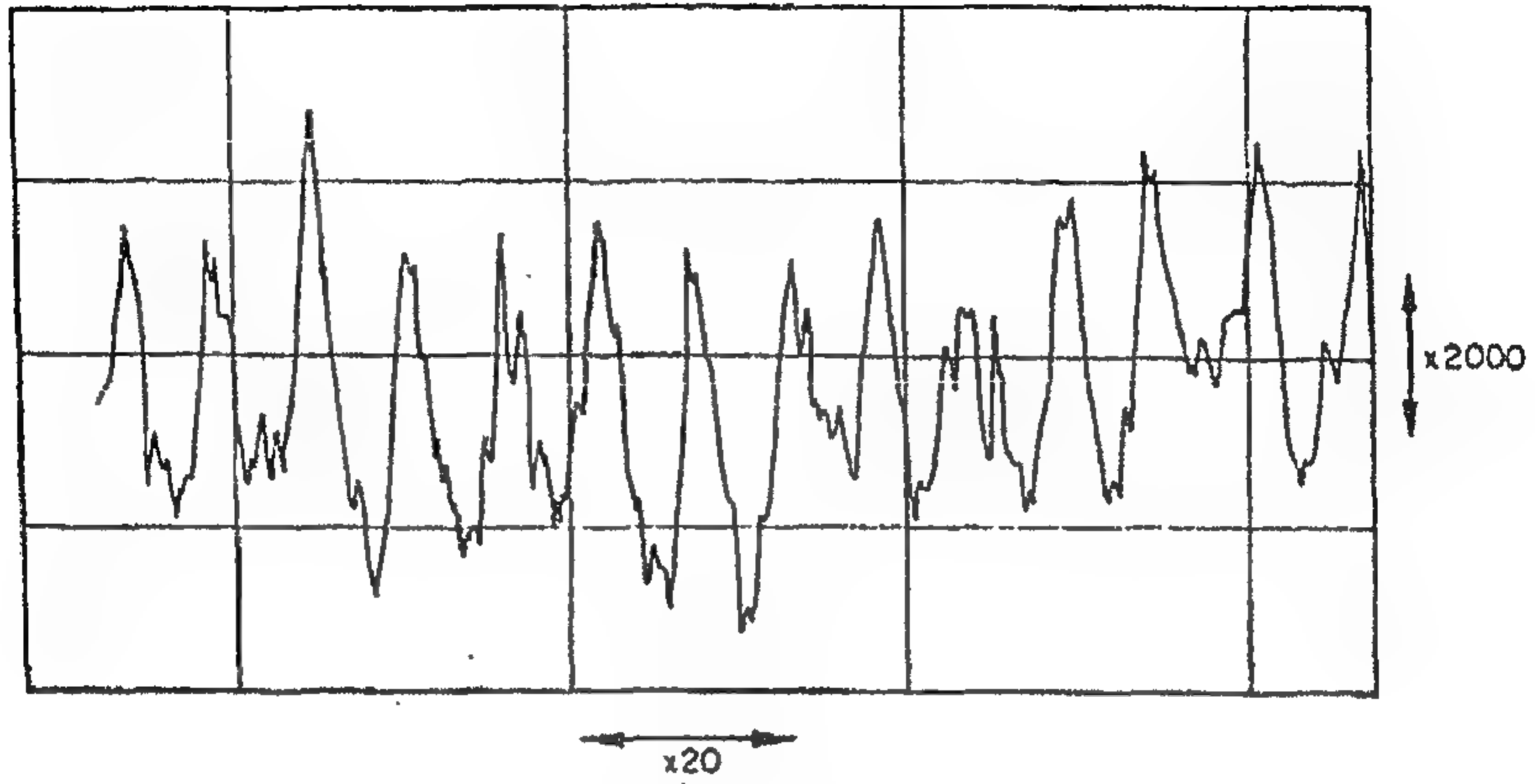
ان هذا الاسلوب في القياس لا يمكن تحقيقه بمنظومة المسطح الضوئي الاعتيادية فهو يتطلب زاويه كبيره نسبياً لوضع المسطح الضوئي لتعطي اهداباً ضيقة (نحيفه جداً ومجهرأ له قدرة تمييز عاليه (High resolving power) ليتمكننا رؤية الاهداب . ان مثل هذا الترتيب يمكن من مشاهدة انظمة التداخل لسطوح الكرات الفولاذية . حيث يشير مقدار استدارة الاهداب الى مدى كروية الكرات واي عدم انتظام في سطحها سيظهر كعدم انتظام في اهداب التداخل . وهناك مجهر للتداخل الضوئي ملائم لهذا النوع من الاعمال يمكن تزويده بألة تصوير (Camera) ليتمكن تسجيل صور دائمه للأهداب . والشكل (12-12) (a) و (b) يبين صورتين أهداب مأخوذة بمثل هذا الجهاز .



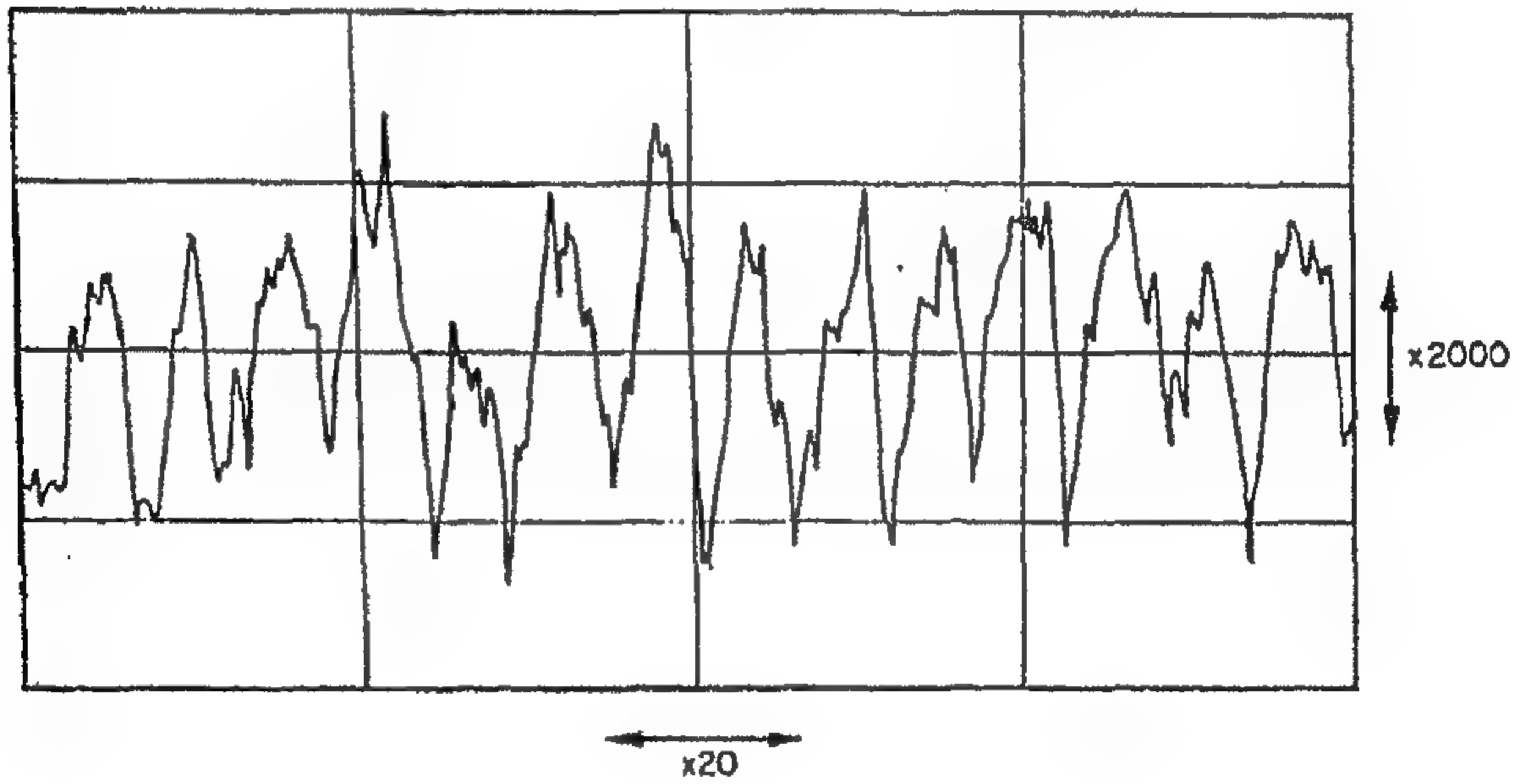
الشكل (12-12) نمط الاهتداب المجهرية في (a) لسطح كرة فولاذية و (b) لخدش على سطح مسطح عمقه $\frac{\lambda}{2}$ او حوالي $0.25 \mu m$.

٦-١ طرائق النسخ (الطبعة) (Replica Methods):

يراد في الكثير من الحالات معرفة نسج (تضاريس) السطح لجزء ما إلا انه لا يمكن لمجس الجهاز الوصول اليه وقياسه كما أنه غير عاكس بصورة كافية في اغلب الاحيان، وبذلك يكون غير ملائم لاستخدام طرائق التداخل الضوئي في القياس، وللتغلب على ذلك من الممكن غالباً الحصول على أثر السطح باستخدام اسلوب نسخ السطح . يتم في الأساس تنفيذ هذا الاسلوب بترطيب قطعة من غشاء (رقائق) مادة استات السيليلوز (Cellulose -Acetate) في الاسيتون لتليينها ثم ضغطها على السطح حتى تتصلد، وبهذه الطريقة يمكن الحصول على نسخة طبق الاصل وبدقة تصل الى حوالي 80%. يستخدم في التقنيات الحديثة راتنج الايبوكسي (Epoxy Resin) و راتنجات أخرى لتصل دقة النسخ الى 100%. يبين الشكل (2-13) و (b) و (a) اثرين لنفس السطح أحدهما مأخوذ من السطح الحقيقي مباشرة والاخر من طبعة الاستنساخ على التعاقب.

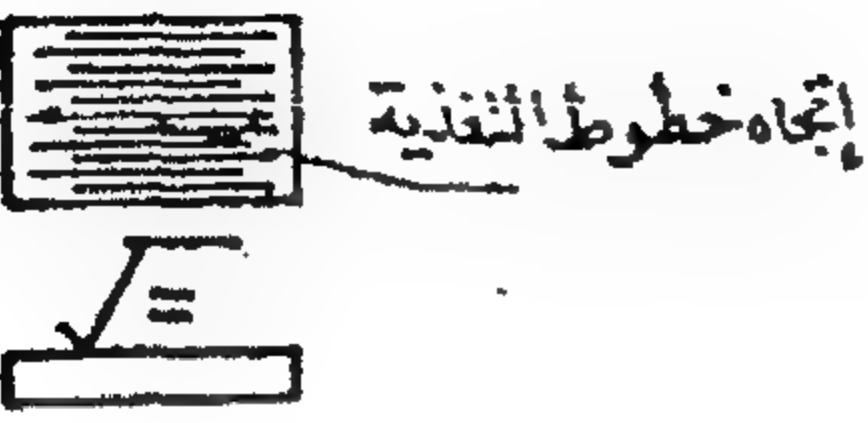







شكل (13a-12) اثر السطح المباشر. تقدر قيمة معدل خط المركز (C.L.A) بمقدار $3.65\mu\text{m}$



شكل (13b-12) اثر طبعة (نسخ) السطح. تقدر قيمة معدل خط المركز (C.L.A) بمقدار $3.45\mu\text{m}$

ويوضح الشكل (12-17) كيفية وضع الرمز الدال على دقة انهاء السطح للسطوح المختلفة لاحد الاجزاء المشكلة.

الرمز	يعني الرمز	مثال
==	اتجاه مخطوط التغذية موازي للخط الممثل للسطح المعني بعلامة درجة التشطيب.	
⊥	اتجاه خطوط التغذية متعامدة مع الخط الممثل للسطح المعني بعلامة درجة التشطيب	
X	اتجاه خطوط التغذية مائلة في كل من الاتجاهين على الخط المائل للسطح المعني بعلامة درجة التشطيب	
ع	خطوط التغذية لها عدة اتجاهات	
0	خطوط التغذية تقريباً دائرية بالنسبة لمركز السطح المعني بعلامة درجة التشطيب	
نق	خطوط التغذية تقريباً نصف قطرية بالنسبة لمراكز السطح المعني بعلامة درجة التشطيب	

شكل (12-14) الرموز المستخدمة في توصيف اتجاه خطوط التغذية حسب طريقة التشغيل.

٧-١٢ الرموز المستخدمة في توصيف درجة الانتهاء السطحي:

(The Representation Used in the Description of Surface Finish)

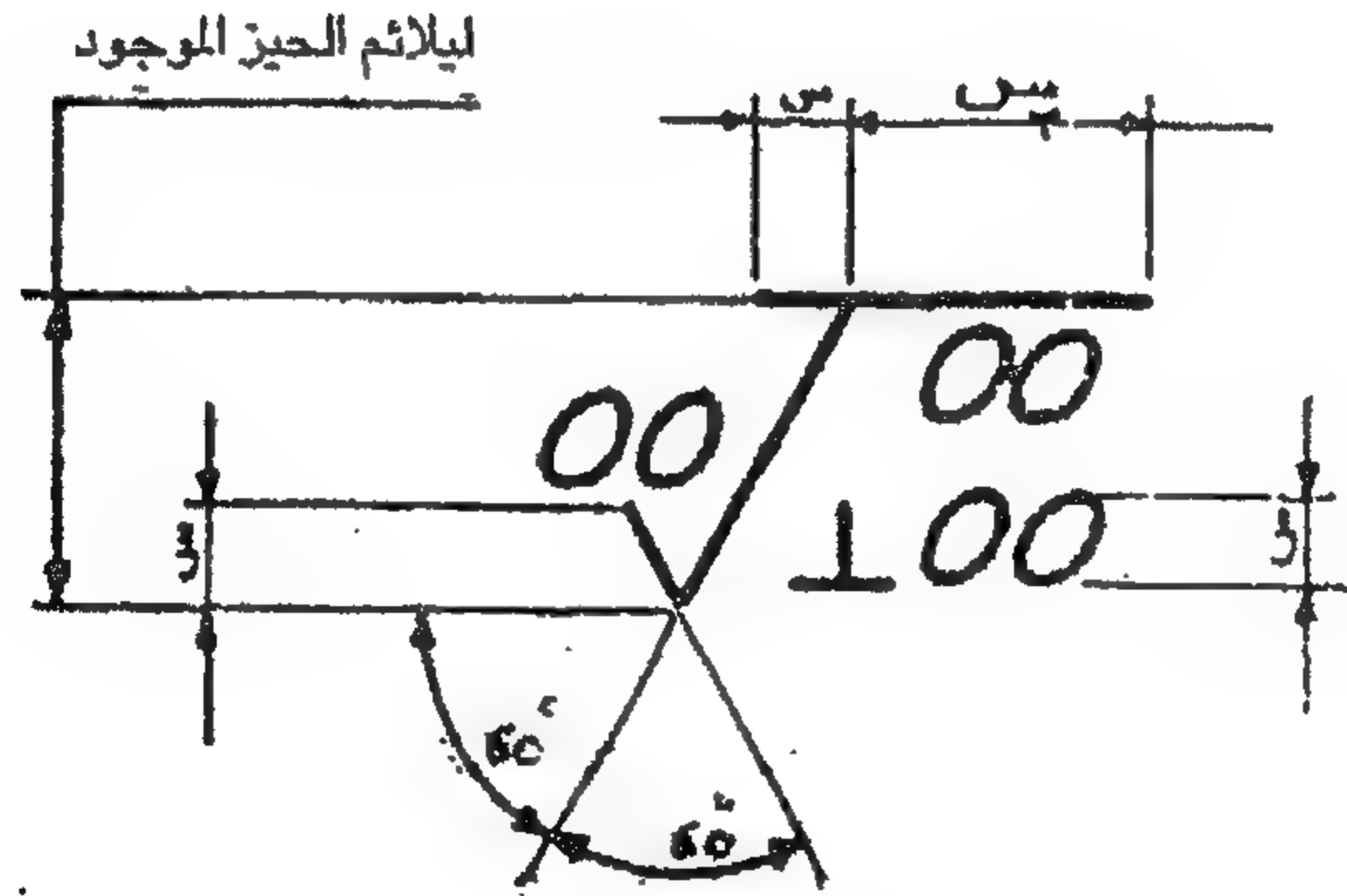
أ- اتجاه علامات التغذية Direction of Feeding Traces

ان اتجاه علامات او آثار التغذية هو الطابع المميز لاتجاه تضاريس السطح الناتج عن طريقة التشغيل المستخدمة. يوضح الشكل (12-14) الرموز المستعملة لسطوح مشغلة لها خطوط تغذية مختلفة حسب طريقة التشغيل.

ب- كيفية كتابة ووضع الرموز على الاجزاء المشغلة:

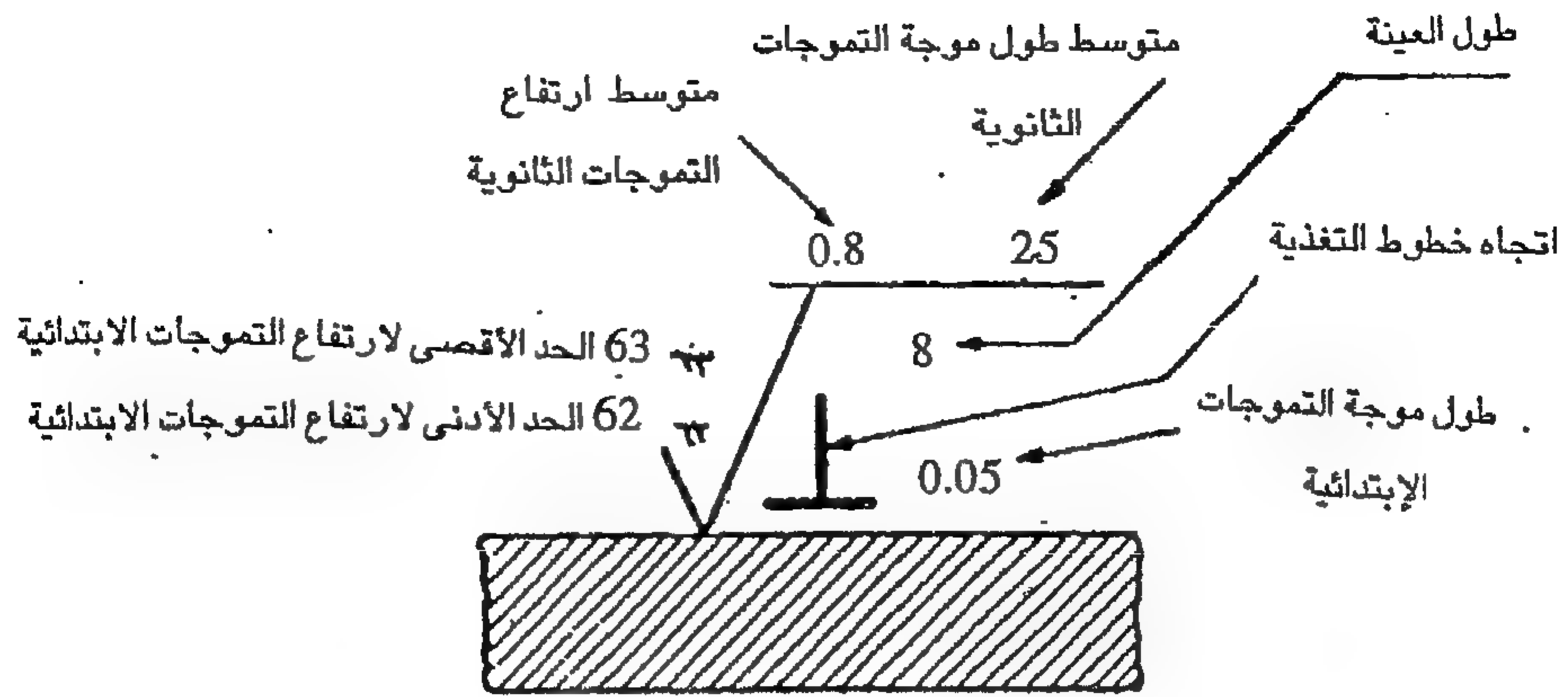
(The way of writting the representation on the finished components)

يستعمل الرمز المبين في الشكل (12-15) في توصيف تضاريس السطح موضعاً عليه المقاسات القياسية. اما الشكل (12-16) فيبين مثلاً لاسلوب توصيف درجة انتهاء السطح بالدلالات المختلفة.



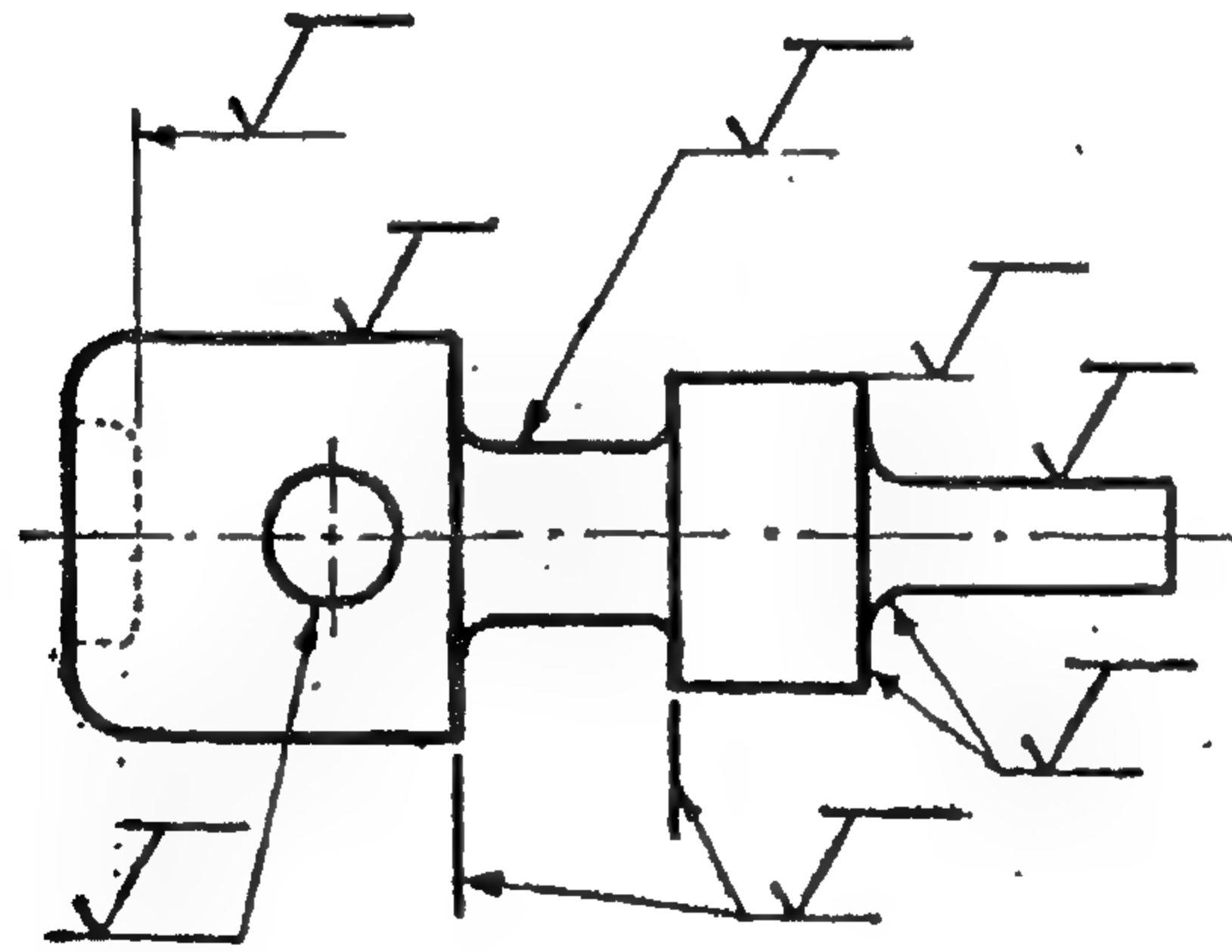
الشكل (12-15) الرمز المستخدم في توصيف درجة انتهاء

السطح بالمقاسات النسبية



الشكل (12-16) طريقة توصيف دقة إنهاء السطح.

ويوضح الشكل (12-17) كيفية وضع الرمز الدال على دقة إنهاء السطح للسطوح المختلفة لأحد الأجزاء المشكلة.



الشكل (12-17) كيفية وضع الرمز الدال على دقة الانتهاء السطحي للأسطح المختلفة التشغيل.

٨-١٢ مدى الانهاء السطحي الذي يمكن الوصول اليه بعمليات التشغيل المختلفة:

(The Extent of possible surface finish that achieved by various machining processes)

يبين الشكل (12-18) لوحة بيانات يظهر فيها مدى قيم الانهاء السطحي المتوقع الحصول عليها عادة بعد كل عملية تشغيل لاختيار أنسب عملية تشغيل ملائمة للوصول الى درجة الانهاء المطلوبة.

درجة تشطيب الاسطح الممكن الوصول اليها بعمليات التشغيل المختلفة

يوضح الرسم البياني مدى درجة التشطيب المتوقع الحصول عليها عادة من كل عملية تشغيل وهو يرشد كلاً من المصمم وعامل التشغيل في اختيار أنسب عملية تشغيل لازمة للوصول الى درجة تشطيب معينة.

عملية التشغيل	درجة تشطيب السطح (ميكروبيتر)
التقطيع بالهبة أو المنشار	0.025 0.05 0.1 0.2 0.4 0.8 1.6 3.2 6.3 12.5 25
المبراة اليدوية	
خرطة ماكينة وتقليد	
التقريب	
خرطة التوجيه	
توسيع بالبرغل	
تجفيف سطحي	
تجفيف اسطواني	
صقل	
تلميع	
تشطيب في مائي الدقة	
سباكة في الرمل	
تشكيل بالحدادة	
السباكة في قوالب	
اسطخ مدلفنة	
الصب في قوالب	
التشكيل بالبيتق	

شكل (12-18)

درجات انهاء (تشطيب) الاسطح التي يمكن الوصول اليها بعمليات التشغيل المختلفة.

تمارين الفصل الثاني عشر

- ١- بين كيف يؤثر نسيج السطح على الخواص الميكانيكية للجزء.
- ٢- عرّف الخشونة وميّز بينها وبين التموج وماهي اسباب نشوء كل منهما.
- ٣- عدد طرائق قياس الخشونة و اشرح واحده منها باختصار.
- ٤- ماهي الاجزاء الرئيسة لأجهزة مقاييس خشونة السطح وماهي أسس عملها؟
- ٥- ماهو المسطح الضوئي وماهي الغاية من استخدامه؟
- ٦- اشرح كيف يمكن استخدام طريقة التداخل الضوئي لمعرفة ماهية السطح.
- ٧- لماذا تقاس خشونة السطح في بعض الاحيان باستخدام طريقة نسخ السطح وكيف يتم ذلك.

المصادر

- 1- Metals Handbook, vol.11 "Nondestructive inspection and quality control" 8th ed. American Society of Metals (ASM) 1976 .
- 2- McMaster R.C., Ed. "Non destructive Testing Handbook", vol. 1 and vol.2. The Ronald press company, 1959.
- 3- McGonagle W.J., "Nondestructive Testing" McGraw Hill Book company Inc. 1961 .
- 4- Hull B. and John V. "Nondestructive Testing " 1 st ed. Macmillan Education Ltd., 1988 .
- 5- Birchon D., "Nondestructive Testing", Published for the design council, The British Standards Institution and The council of Engineering Institution by Oxford University press, 1975 .
- 6- The Institution of Metallurgists, "Ultrasonic Nondestructive Testing" Monograph 9, The Chameleon press Ltd . 1984 .
- 7- Cullity B.D., "Elements of X-Ray Diffraction " Addison Wesley publishing company. Inc. 1978 .
- 8- Barrett C. and Massalski T.B., "Structure of Metals" McGraw - Hill. Inc. 1966 .
- 9- Klyg H.P. and Alexander L.E., "X-ray Diffraction Procedures" 2nd ed., Wiley Interscience pub. 1974.
- 10- Murr L.E., "Electron Optical Application in Material Science" McGraw-Hill, Inc. 1970 .

- 11- Bowen D.K.and Hall C.R., "Microscopy of Materials" Macmillan Press Ltd 1975 .
- 12- Edington J.W., "The Operation And Calibration of The Electron Microscope "Philips Technical Library, Monograph 1. The Macmillan Press Ltd., 1975 .
- 13- Edington J.W., "Electron Diffraction in the Electron Microscope" "Philips Technical Library, Monograph 2, The Macmillan press Ltd., 1975 .
- 14- Edington J.W." Interpretation of transmission Electron Micrographs" Philips Technical Library, Monograph 3, The Macmillan Press Ltd., 1975.
- 15- Edington J.W." Typical Electron Microscopy Investigations" Philips Technical Library , Monograph 4, The Macmillan Press Ltd., 1975 .
- 16- Holt D.B., Muir M.O., Grant P.R.and Boswarva I.M., "Quantitative Scanning Electron Microscopy" Eds.Academic Press Inc. (London)Ltd.2nd Printing 1976 .
- 17- Kay D.Ed."Techniques for Electron Microscopy" 2nd ed. Blackwell Scientific Publication Ltd.1965 .
- 18- DeHoff R.T.and Rhines F.N., "Quantitative Microscopy" McGraw-Hill Book co.1968 .
- 19-ASTM STP 504 ,"Stereology and Quautitative Metallography" 1970 .

- 20- Vander Voort G.F., "Metallography- principles and practice" McGraw-Hill Book Co., 1984 .
- 21- Smallmann R.E. and Ashbee K.H., "Modern Metallography" Pergamon Press 1969 .
- 22- Raghavan V., "A First Course In Materials Science" Prentice- Hall of India Private Ltd., New Delhi, 2nd ed., 1982 .
- 23- Blitz J., King W.G. and Donald G., "Electrical, Magnetic and Visual Methods of Testing Materials" Butterworths, 1969.
- 24- Davies D.J. and Oelmann L.A., "The Structure, Properties and Heat treatment of Metals", Pitman, 1983.
- 25- Higginson C.A. Ed., "Experiments in Materials Technology" Affiliated East -West Press PVT. Ltd. New Delhi, 1973 .
- 26- Dieter G.E., "Mechanical Metallurgy" 2nd ed., McGraw-Hill Inc. 1976 .
- 27- Rollason E.C., "Metallurgy for Engineers" 4th ed. Edward Arnold (Publishers) Ltd. 1980 .
- 28- Higgins R.A., "Engineering Metallurgy -Part I Applied physical Metallurgy", 5th ed., Hodder and stoughton Ltd., 1983 .
- 29- Higgins R.A., "Properties of Engineering Materials", Hodder and stoughton Ltd., 1977 .
- 30- AL- Haidary, "Progress of Vanadium Carbide in Low Alloy steel as Determined by Electrical Resistivity and Electron Microscopy Measurements," J. of Engin. and Tech., vol. 10 No. 2 pp 8-28, 1991 .

- 31- Mc Gee T.D., "Principles and Methods of Temperature Measurement" John Wiley and Sons, 1988 .
- 32- Yarwood J., "High Vacuum Technigue" 4 th ed. Chapman and Hall Ltd. 1975 .
- 33- Holland L., "Vacuum Deposition of Thin films, Chapman and Hall Ltd., 1970 .
- 34- Dieter G., "Engineering Design, A Materials and Processing Approach", Mc Graw-Hill Inc. 1983 .
- 35- Wannacott R.J. and Wonnacott T.H., "Statistics, Discovering Its Power", John Wiley and Sons , 1982 .
- 36- Gupta R.C. "Engineering Manufacturing and statistical Quality Control", Khann Pub. 3rd . 1983 .
- 37- American Welding Society (AWS), Welding Handbook vol. 5, "Engineering, Costs, Quality and Safety " Kearns W.H., Ed., 1984 .
- 38- Galyer J.F. & Shotbolt C.R., "Metrology For Engineers" A Cassel Technical book, London, 1979 .
- 39- Matt S.R. "Electricity and Basic Electronics" Pub . The Coodheart-Willcox company, Inc. Illinos. 1998 .

٤٠ - فيزياء الحيود، د. سامي مظلوم صالح، الجامعة التكنولوجية ١٩٨٢ .

٤١ - تكنولوجيا القياس والمعايرة، سامي محمود الخضري ، ط ١ ، مكتبة الانجلو المصرية، ١٩٦٨ .

المصطلحات العلمية وما يقابلها بالعربية

A

absorption contrast	التباين بالإمتصاص
absorption edge	عتبه الامتصاص
absorption	امتصاص
aberration	زيغ
accelerators	معجلات
acceleration	تعجيل
accuracy	دقة، ضبط
acoustic impedance	ممانعة صوتيه
activity	نشاط (فعالية)
achromatic	لا لوني
advertising costs	كلف الاعلانات
attenuation	توهين
alternating current	تيار متناوب
alternating stress	اجهاد متناوب
amplitude	سعة الموجة
ampere	أمبير
amplification	تضخيم ، تكبير
amorphous	لا بلوري

anode	مصعد
analysis	تحليل
annealing	تلدين
automatically	الياً
aplanatic point	النقطة المسوية
aperture	فتحة
airframe	بدن الطائرة
avalanche ionization	تأين التيهور (التأين المفاجئ الضخم)
areal fraction	كسر مساحي
associated waves	امواج مرافقه
associated wavelength	الطول الموجي المرافق
astigmatism	اللابؤريه
atomic packing factor	معامل التراص الذري
atomic scattering factor	معامل الاستطارة الذري
atomic number	العدد الذري
atomic plane	مستوى ذري
atmospheric pressure	الضغط الجوي
atmosphere	جو
Auger microscope	مجهر اوجر
average	المعدل الجيري

B

back scattered electrons	الكترونات مستطارة رجوعاً
ballast resistance	مقاومة الموازن
baffle	كابح
baffle value	صمام كابح
ball bearings	مرتكزات كروية
bar chart	لوحة الاعمدة
barrel distortion	تشويه البرميل
beam	شعاع، حزمة من شعاع
betatron	جهاز معجل الالكترون
biology	علم الاحياء
binary alloy	سبيكة ثنائية
bias	تحيز، انحياز
black body	الجسم الاسود
blurring	عدم وضوح
bond	أصره، رابطة
body centered-cubic	مكعب متمركز الجسم
boundaries	حدود
braces	أقواس كبيره { }
brass	شبه، نحاس أصفر
brittleness	هشاشية

C

camera	آلة تصوير (كاميرا)
capture	أسر
calibration	معايرة
cantilever	حيد، عتلة
carbon replica	طبعة كاربونية
carburizing	كربنه
carburized Layer	طبقة مكربنه
cast iron	حديد الزهر
categories	أصناف، فئات
cathodoluminescence	الاضاءة المهبطية
capture cross section	المقطع العرضي للأسر
ceramics	خزفيات
characteristic X - rays	الاشعة السينية المميزه
chart recorder	راسم بياني
characteristic radiations	اشعاعات مميزة
chance	صدفة
chemical composition	تكوين كيمياوي
chromatic aberration	الزيغ اللوني
circular	دائري

coating	طلاء، عمليه طلاء
cassette	علبة فلم، حافظه فلم
class	فئة، صنف
confidence curves	منحنيات الثقة
class intervals	فواصل الفئات
coil impedance	ممانعة الملف
coil conductance	توصيل الملف، توصيلية الملف
conductance	توصيل، توصيلية
conductors	موصلات
conduction	توصيل
constitution	تكوين
conductivity	توصيلة
cracks	شقوق
confusion	تشويش
coefficient	معامل، دليل
continuous radiation	أشعة مستمرة
crystal	بلوره
crystallography	علم البلورات
cystallographic axes	المحاور البلوريه

coherent	متوافقة، متلاحمة
cubic	مكعب الشكل
complex number	عدد مركب
crucible	بوتقه
counter	عداد
constant volume gas thermometer	محرار غاز الحجم الثابت
composite materials	مواد مركبة
crayons	اقلام ملونه
cones	مخاريط
cold junction	نقطة الربط الباردة
cost	كلفة
compensating leads	أسلاك توصيل معادلة
corrosion	تآكل
corrosion - fatigue	كلال تآكلي
cold shuts	عدم تلاحم بارد
crank shaft	عمود مرفقي
coil	ملف
compressibility	الانضغاطية
curvature of field	انحناء المجال

crown glass	زجاج التاج
concrete	خرسانه
creep	زحف
cyclic stress	اجهاد دوري
cup dome	قبة القدح
carbide	كاربيد
casting	سباكه
contact	تماس
copper	نحاس
cooling	تبريد
curves	منحنيات
cyclic	دوري

D

damage	تلف
deterioration	تدهور
decay	اضمحلال
disintegration	انحلال

direct	مباشر
direct current	تيار مباشر
diffraction	حيود
diaphragm	حجاب
depth of field	عمق المجال
denth if focus	عمق التبر
diffractometer	محياد
diffrentiation	تفاضل
deceleration	تباطؤ، تقصير
detector	كاشف
dislocation	انخلعه
diffusion	انتشار
ductile	مستمثل
device	جهاز، اداة
degree of freedom	درجة الحرية
diffusion pumps	مضخات انتشاريه
dynamic systems	اجهزة حركية
desorption	المج
detector	كاشف

direction	اتجاه
diamond	ماس
diagonal length	طول المحور
deflection	انحراف
ductility	مطيليه
dial gauge	مقياس قرصي
design	تصميم
dispersion	تشتيت
deviation	انحراف
detection	كشف
dry	جاف

E

Eddy currents	تيارات دوّامه
electron gun	قاذف الكتروني
emission	انبعاث
edge dislocation	انخلاعه طرفيه
etching	اظهار، تنميش

extracting surface replicas	طبعة استخلاص سطحية
electrodeposition	ترسيب كهروكيميائي
electrical signal	إشارة كهربائية
evaporation	تبخير
electron probe micro analyser	محلل المجس الالكتروني الدقيق
energy dispersive spectrometer	المطياف المفرق للطاقة
environmental studies	دراسات بيئية
equiaxed grains	حبيبات متساوية المحاور
equilibrium	اتزان
emissivity	الانبعاثية
eyepiece lens	عدسه عينية
excitation	تهيج
exciting current	التيار المهيج
energy barrier	حاجز الطاقة
electrostatic field	مجال كهربائي مستقر
elastic behaviour	سلوك مرن
energy	طاقة
embrittlement	هشاشيه
endurance limit	حد التحمل ، حد الصمود

electrolyte	منحل كهربائي
event	حادثة
exclusive events	حوادث متنافيه
extreme value	قيمه متطرفه
ellipse	شكل اهليجي

F

factor	عامل
fatigue	كلال
fill factor	عامل الملء
fast neutrons	نيوترونات سريعة
fluorescent material	ماده متألقة
focus	بؤره
focusing	تبئير
focal length	البعد البؤري
filament	شعيره
features	معالم
filter	مرشح

fluorescent screen	شاشة متألقة
face - centered cubic	مكعب متمركز الوجه
flash light	ضوء ومضي
frequency	تردد ، تكرار
fracture	كسر
fracture toughness	متانة الكسر
fused silica	سليكا نقيه
fire bricks	طابوق ناري
floppy disk	قرص مرن
free electrons	الكترونات حرة
field	مجال
Fermi level	مستوى فرمي
flux	فيض
film	غشاء
flint glass	زجاج الصوان
field emission microscope	مجهر انبعاث المجال
field ion microscope	مجهر ايون المجال
fringes	اهداب
flange	شفه

force	قوة
fluctuating stress	اجهاد متقلب
fatigue limit	حد الكلال
fatigue life	عمر الكلال
fluoroscopy	تقنية التألق
feed back	تغذية عكسية (مرتدة)
frequency diagram	مخطط تكراري
flaws	تصدعات
failure	فشل

G

gap	فجوة فاصلة
gasket	حشيه
gas ballast	موازن الغاز
gauge length	مدلول الطول
games	العاب
galvanometers	كلفانوميتر، مقياس غلفاني
gamma rays	أشعة كاما

gauge	مقياس
gamma ray spectrometer	مطياف اشعة كاما
grains	حببيات ، بلورات
grain size	حجم حبيبي
grinding	تنعيم
grating	محزز
grid	شبكة
geological research	بحث جيولوجي ، بحث طبقات الارض
gun of electrons	قاذف الكترونات

H

half- life	عمر النصف
hard X-ray	الاشعة السينيه الشديده
hardness	صلادة
hardening	تصليد
hexagonal close packed	سداسي متراص
histogram	مدرج تكراري
hot junction	نقطه الربط الحاره

hot	حار
hot stage microscope	مجهر المرحلة الحاره الضوئي
hot cathode ionization	المقياس الايوني للمهبط الساخن
hydrogen	هيدروجين
hydrogen embrittlement	الهشاشية المتسببة عن الهيدروجين
hydrostatic gauges	مقاييس هيدروستاتيه

I

iris	قزحية
inductive reactance	المفاعلة الحثيه
inductance	محاثه حثيئه
inductor=inducer	محثه ، حاثه
impedance	ممانعه كهربائية
insulators	مواد عازلة ، عوازل
isotopes	نظائر
interference	تداخل
intermediate lens	عدسة وسطية
index	دليل ، تسمية

indices	ادلة
intermetallic compound	مركب كيمياوي معدني
inclusions	اكتنافات
international Annealed Copper Standard	النحاس المالدن القياسي عالمياً
imperfection	خلل
image quality indicator	كاشف نوعية الصورة
infra-red radiation	اشعة تحت الحمراء
intensity	شدة
interstitial atoms	ذرات بينيه
indentation	أثر الغرز
internal cavities	فجوات داخلية
inspection	فحص
incidental sale	بيع طارئ

J

jet water	ماء متدفق
jet electropolishing technique	تقنية الصقل الكهربائي بالتدفق

K

kinetic energy طاقة حركية

L

lattice شبكيه

lattice parameter معلمه الشبكية

lattice point نقطة شبكيه

laser microprobe مجس الليزر الدقيق

lamp مصباح

lack of bond عدم تمامية الترابط

laps ثنيات

lateral expansion تمدد جانبي

laminations تصفيحات

lift off factor عامل التباعد

lens عدسه

lens stop حابس العدسه

leakage magnetic flux الفيض المغناطيسي المتسرب

liquid سائل

liquid penetrant testing الفحص بالسائل المتغلغل

limit of resolution	حد التمييز
least confusion circle	الدائرة الاقل تشويهاً
light elements	عناصر خفيفة
lineal fraction	كسر خطي
lime	كلس
longitudinal magnetization	تمغنت طولي
layer	طبقة
lead	رصاص
load	حمل
leakage	تسرب
low alloy steel	فولاذ منخفض السبيكة
lubrication	تزييت
lubricated indenter	اداة غرز مزيته
loading	تحميل
local extendion	استطالة موضعية

M

magentization	تمغنت
---------------	-------

magnetic flux	فيض مغناطيسي
magnetic induction	حث مغناطيسي
magnetic field strength	شدة المجال المغناطيسي
magnetic permeability	المنفذية المغناطيسية
magnetic susceptibility	التأثرية المغناطيسية، القابلية على التمغنط
manometer	مضغاط انبوبي
mass production	انتاج بالجملة
magnetic saturation	التشبع المغناطيسي
mass	كتله
mass absorption coefficient	معامل امتصاص الكتلة
mean	وسط حسابي
mean free path	معدل المسار الحر
median	وسيط
mode	منوال، أسلوب
medium	وسط، محيط
microscope	مجهر
maximum load	الحمل الأعظم
mismatch	عدم توافق

miniature	المصغر، نسخة مصغرة
misapplication	سوء التطبيق
microhardness	صلادة دقيقة
metal	معدن
minerals	خامات معدنية
mica	ميكاً
miller indices	ادلة ملر
microstructure	بنية دقيقة ، بنية مجهرية
mechanisim	الآلية
mild steel	فولاذ مطيل
micro wave	الاشعة الدقيقة (الامواج الدقيقة)
moving mass	الكتلة الحركية
morphology	دراسة بنية الشيء
monochromatic	احادي الموجه
monoclinic	اجادي الميل
momentum	زخم
modulation	تغيير، تعديل
muffle	لافح
multichannel analyzer	محلل القنوات المتعددة

moderator	معدّل، مادة معدله، مهدئ
modulus	معيّار
modulus of rigidity	معيّار الجسوء
magnetostriction	التقبض المغناطيسي

N

neuclear reactor	مفاعل نووي
neutron radiiography	تصوير أشعاعي نيوتروني
neutron	نيوترون
neutron irradiation	تشعيع نيوتروني
necking	تحضر
noise	ضوضاء
nominal stress	اجهاد اسمي
notch	حز، ثلمه
normal distribution	التوزيع الاعتيادي
non ferrous alloys	سبائك لا حديدية
null point	نقطة الخمود
nonprimitive cell	خليه غير اولية

O

Oil dash- pot	نبيطه زيتيه
Ohm	اوم
occasional observations	المشاهدات العرضية
objective lens	عدسه شبيئية
origin	نقطة الاصل، اصل
order	مرتبة، ترتيب
orientation	توجه، وضع
orthorhombic	معيني الشكل
oscillation	تذبذب
oscilloscope	منظار الذبذبات
orbital electrons	الكترونات مداريه
overlapping	تراكب
optical microscope	مجهر ضوئي
oblate	شبه كروي مفلطح

P

parallelogram	متوازي أضلاع
parallelepiped	متوازي السطوح

parameters	معالم
parabola	قطع مكافئ
pattern	نمط
packing direction	اتجاه التراص
path	طريق ، مسار
parameter	مَعْلَمه
pellets	كريات
peak	قمة ، ذروة
performance	اداء
periodic arrangement	ترتيب متكرر
penetration	اختراق
plastics	لدائن
pole piece	فتحة العدسه
phase contrast	التباين الطوري
phase	طور
primitive cell	خلية اوليه
point lattice	شبيكة نقطية
plate	لوح
photomultiplier	مضاعف فوتوني

phase transformation	تحول طورى
projector lens	عدسه اسقاطية
photon	فوتون
photoelectron	الكترؤن فوتونى
photocathode	مهبط فوتونى
phase diagram	مخطط طورى
polymers	بوليمرات
Pollutant	ملوث
proportional counter	عداد تناسبى
process	عملية
precipitation	ترسيب
precipitates	ترسبات
point fraction	كسر نقطى
potential field	مجال الجهد
pyrometer	مقياس درجات الحرارة
potential energy	طاقة كامنة
point imperfection	خلل نقطى
penumbra	شبه الظل
photographic film	فلم تصوير

power supply	مجهز قدره
pottery	فخاريات
Piezo- electsic effect	التأثير الكهربائي الاجهادي
probe	مجس
pipng defects	عيوب انبويه
potentiometer	مقياس الجهد
pin-cushion distortion	تشويه وساده الدبابيس
point difect	عيب نقطي
proportionality limit	حد التناسب
plastic strain	انفعال لدن
proof stress	اجهاد الصمود
Probability	احتمالية
pictorial method	طريقة صوريه
product	منتوج ، منتج
point source	مصدر نقطي
prolate	شبه كروي متطاوول
permeability	المنفذية
photochemical effect	تأثير كيميائي ضوئي
pump	مضخة

pure

نقي

Q

quality control

السيطرة النوعية

quantum mechanics

ميكانيك كمي

quantum theory

نظرية الكم

quantum state

مستوى كمي

quantitative metallography

الميتالوغرافيه الكمية

quenching

اخماد

R

raw material

مادة خام

random

عشوائي

rays

أشعه

radiations

اشعاعات

radioactive decay

اضمحلال إشعاعي

radioactive isotopes

نظائر مشعه

radiography

فحص شعاعي

radius	نصف قطر
raster	نمط خطوط المسح (راسم)
reactivity	تفاعليه
reactive	مفاعله
resistivity	مقاوميه
resolution	تمييز، ميز
resolving power	قدره التمييز
rectifier	جهاز معدل التيار المتناوب
rest mass	كتلة السكون
refractive index	دليل الانكسار
reciprocal lattice	الشبكية المعكوسة
reflected electrons	الالكترونات منعكسه
recrystallisation	اعادة التبلور
reduction	اختزال
reaction	تفاعل
rhombohedral=Trigonal	ثلاثي الاضلاع
reflection coefficient	معامل الانعكاس
receiver	مستلم
rigidity	جسوء ، جساءه

repeating stress	اجهاد متكرر
relative frequency	تكرار نسبي
reliability	وثوقيه
reproducible	امكانية الاعداد
rolling	دحوق، درفلة
rotary pump	مضخة ميكانيكية دوارة
roughing pumping	ضخ اولي
roughing vacuum	فراغ اولي
rupture	تهشم، انهيار
resistance	مقاومة

S

sand blast	النفث الرملي
sample	نموذج
seams	ثنيات
scheme	نهج، اسلوب، خطه، مخطط
schematic diagram	رسم توضيحي
scattering	استطاره

semimetals	اشباه المعادن
semiconductors	اشباه الموصلات
secondary electrons	الكثرونات ثانوية
single crystal	بلوره احاديه
specimen	عينه
stiffness	صلابه
stacking fault	خلل النسق
soft X-rays	اشعة سينييه ضعيفه
space	فضاء
statistic	احصاء
spectrometer	مطياف
structure factor	معامل البينه
screw dislocation	انخلاعه لولبيه
surface morphology	تضاريس السطح
substrate	ماده سائده تحتيه
scintillator	عداد ومضي
secondary ion emission microscope	مجهر بعث الايونات الثانويه
solid angle	زاويه صلبه
semi-quantitative	شبه كمي

strain	انفعال
stress	اجهاد
stereology	علم التجسيم (الذي يمكن استخراج معلومات بثلاث ابعاد من بيانات مأخوذة من بعدين)
structure	بنية ، تركيب
subcritical assebly	التجمع قبيل الحرج
spheroidization	تكوين
stress-relieving	ازالة الاجهاد
slab	بلاطه
silica brick	طابوق السليكا
solute atoms	ذرات مذابه
solvent	مذيب
static systems	اجهزة أو أنظمة سكونيه
segregation	فرز
stress -corrosion	تآكل اجهادي
scrap	منبذات ، خرده
steel	فولاذ
scanning electron microscope	المجهر الالكتروني الماسح
scaler	معداد

sagittal	سهمي
stigmator	مبئر
sputtering	رش
space charge	شحنة الحيز
strength	مقاومه ميكانيكه
shearing force	قوة قصيه
sensitivity	حساسيه
surface finish	انهاء سطحي
standard dimensions	ابعاد قياسيه
sheets	صفائح
screw	لولب
shock loads	اجمال صدميه
sharpness	حده
striking energy	طاقة الاصطدام
slip bands	اشرطة الانزلاق
scratch	خدش
sinusoidal	جيببي
standard deviation	انحراف معياري
statistical population	مجتمع احصائي

subgroup	طويفه
selection	اختيار
specifications	مواصفات
scale	تدريج
supplier	مجهز
stress relaxation	ارتخاء الاجهاد
software	برامجيات

T

target	هدف
tangential	مماسي
test	فحص، اختبار
tensile stress	اجهاد الشد
tensile testing	اختبار الشد
tempering	مراجعة
thermal neutrons	نيوترونات حراريه
thickness	سُمك
tetragonal	رباعي الاضلاع

torque	عزم
trails	محاولات
tie-Line	خط الربط، خط الوصل
take off angle	زاوية القطع
true stress	اجهاد حقيقي
twisting	لي
topography	تضاريس
twinning	توأمة
triogonal = rhombohedral	ثلاثي الاضلاع
triclinic	ثلاثي الميل
thin film	غشاء رقيق
toughness	متانه
thermometer	محرار
thermocouple	مزدوج حراري
thermoelectric effect	التأثير الكهربائي الحراري
temperature	درجة الحرارة
thermos	ترمس، وعاء حافظ للحراره
transition metals	معادن انتقاليه
technology	تقنيه

thermal test	الفحص الحراري
thermal neutrons	نيوترونات حرارية
transmission coefficient	معامل النفوذ
transmission electron microscope	مجهر الكتروني نافذ
transducer	محول طاقة
transmitter	مرسل (باعت)
television	تلفاز
thermistor	متحسس درجة الحرارة (الثرمستور)

U

ultrasonic waves	امواج فوق السمعيه
ultraviolet	فوق البنفسجية
uncertainty principle	قاعدة عدم التأكد
units	وحدات
under cooled	دون المبرد
unit cell	خليه اساسيه

V

vapour	بخار
vapour pumps	مضخات بخاريه
valve	صمام
vacuum	فراغ
vacancies	شغور، فراغات
vactor	متجه
vice	ملزمه
variance	تباين
variation	تغير
vessel	وعاء
velocity	سرعه
vibration	اهتزاز
video	ترئيه الصور (تحويلها من اشارات الكترونيه الى صور مرئيه) أو حامل الصور
Volt	فولت
voltage	فولتيه
volume	حجم
volume fraction	كسر حجمي
vertical	عمودي

W

wave front	جبهة الموجه
wavelength	طول موجي
wall	جدار
washing	غسل
washer	قَلَّكه
wave number	العدد الموجي
wavelength dispersive spectrometer	المطياف للأطوال الموجية
white radiation	اشعة بيضاء
wheel	دولاب
wedge	اسفين
white metal bearing	معادن المرتكزات البيضاء
wet	رطب
wear	بلى، بلي
weather	جو، طقس
welding	لحام
weldability	اللحاميه
wrought metals	معادن مشكله
workability	قابلية التشغيل
work function	دالة الشغل

X

X-rays

أشعة سينية

Y

yieldpoint

نقطة الخضوع

yield strength

مقاومة الخضوع

young modulus

معيار يونك (معيار المرونة)

Z

zinc

خارصين

zone

منطقة

المؤلف في سطور

- نال شهادة البكالوريوس سنة ١٩٦٦ من جامعة بغداد
- حصل على شهادة الماجستير سنة ١٩٧٠ من نفس الجامعة ثم عمل كمدرس مساعد فيها.
- نال شهادة الدكتوراة في حقل هندسة المعادن من جامعة ستراثكلايد في بريطانيا سنة ١٩٨١.
- عين كمدرس في قسم هندسة الانتاج والمعادن في الجامعة التكنولوجية بغداد - العراق.
- قام بتدريس العديد من المواضيع النظرية والعملية في الجامعة التكنولوجية ولرحلتي الدراسات الاولى والعليا الجامعية وفي مختلف الاقسام.
- شارك في العديد م
- ن الندوات والمؤتمرات العلمية اضافة الى دورات التعليم المستمر.
- اشرف على العديد من طلبة الدراسات العليا (١٥ طالب ماجستير و٥ طلاب دكتوراة)
- لة ٣٧ بحثا في مجال الاختصاص في مجلات عالمية وعراقية.
- ترجم كتابين هما :
- المواد الهندسية مدخل لخواصها وتطبيقاتها. طبع لحساب الجامعة التكنولوجية سنة ١٩٩٠.
- المعادن بنيتها وخواصها ومعاملاتها الحرارية. طبع لحساب الجامعة التكنولوجية سنة ١٩٨٩.
- لة كتاب ((النحاس وسبائكه)) معد للطبع.
- كان عضوا في مختلف اللجان الجامعية كالجنة العلمية ولجنة الترقيات العلمية ولجنة البيئة.
- نال مرتبة الاستاذ المشارك سنة ١٩٨٧.
- لة عدة بحوث جارية حاليا.
- حصل على مرتبة الاستاذية في بداية سنة ١٩٩٣.
- منح مع اعضاء المجموعة براءة الاختراع المرقمة ٢٥٢٩ ومؤرخة في ٢٥/٤/١٩٩٤ والمسجلة في جهاز التقيس والسيطرة النوعية - العراق.
- كان عضوا في هيئة تحرير مجلة الهندسة والتكنولوجيا.
- شغل منصب رئيس فرع هندسة المعادن لاكثر من مرة.
- منح براءة اختراع ثانية مرقمة ٢٧٢٤ ومؤرخة في ٢٨/٧/١٩٩٨ مسجلة في جهاز التقيس والسيطرة النوعية - العراق.
- لة خدمة جامعية تربو على ثمانية وعشرين سنة.
- لا يزال يعمل استاذ في كلية الهندسة / دائرة هندسة المواد والمعادن / جامعة البلقاء التطبيقية / الاردن ويشرف حاليا على عدد من طلبة الدراسات العليا.

اختبارات المواد الهندسية



عشمان - خنكلا
هاتف 079/ 5010244-5352086
ص.ب 184034 عشمان 11118 الأردن

المعزز
للنشر والتوزيع